

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y
AUTOMÁTICA

INGENIERÍA INDUSTRIAL



PROYECTO FIN DE CARRERA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE UNA
CÁMARA DE POLVO**

AUTOR: Andrés Alberto Amarilla Redondo

TUTOR: Néstor Eduardo Nava Rodríguez

Octubre, 2010



AGRADECIMIENTOS.

Me gustaría dar las gracias a Néstor, mi tutor, por aconsejarme y ayudarme durante todos estos meses de esfuerzo, así como brindarme la oportunidad de trabajar en un ambiente tan cordial y humano. También me gustaría agradecer a toda la gente de Arquimea y Expace por su ayuda constante y el trato inigualable, Gracias.

A mis padres, Andrés y Mena, porque sin ellos no hubiera sido posible llegar hasta aquí, gracias por los valores que me habéis inculcado, gracias por la educación recibida y sobretodo, gracias por estar ahí.

A mi hermana Ana, por echarme una mano cuando más lo necesitaba sin pedir nada a cambio y en general, a toda mi familia, por su apoyo incondicional.

Y por último y no por ello menos importante, gracias a todos mis amigos, especialmente a mis compañeros de piso y universidad, por soportarme y ayudarme en el transcurso de esta carrera.



RESUMEN.

En el presente proyecto se intenta abordar el proceso de diseño, construcción y validación de una cámara de polvo, así como los inconvenientes y cambios realizados en el proceso. Esta cámara dará soporte al proyecto europeo MEIGA al permitir la calibración del sensor de polvo, de este proyecto, antes de ser enviado a Marte. El Objetivo principal es crear dentro de un espacio cerrado, las condiciones de polvo de la atmósfera de Marte. Para este fin es necesario mantener dicho espacio a bajas temperaturas, seco, limpio y opaco en una atmósfera inerte, para posteriormente generar la nube de polvo. Para su desarrollo, se utilizó, como estructura externa de la cámara, un congelador industrial de grandes dimensiones, garantizando el enfriamiento y el aislamiento, así como dos sistemas, constituidos por ventiladores para crear un régimen de flujo turbulento y distribuir el polvo homogéneamente en el interior de la cámara. La opacidad se obtuvo pintando el interior de negro mate, mientras que la atmósfera inerte se logra inyectando n tr geno gaseoso.



ABSTRACT.

The present project attempts to touch on the process and design of constructing and validating a dust chamber. Just like the inconvenience and changes made. This machine will lead support to the European MEIGA project allowing the support dust sensor to be calibrated before the project is sent to Mars. The principal objective is to create the conditions of the Mars's dust inside a closed place. It is necessary maintain the desire space under low temperatures, dry, clean and opaque in an inert atmosphere to generate a cloud of steam. For the development, we used an external structure of the dust chamber, an industrial refrigerator of larger dimensions to guarantee the refrigeration and isolation, like two systems constituted with fans, to create a turbulent flow and distribute the dust homogenously, in the interior of the chamber. The opaqueness was grabbed by painting the interior with black, while we get the inert atmosphere injecting gaseous nitrogen.



Índice de contenidos.

AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS	V
ÍNDICE DE FIGURA	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ACRÓNIMOS.....	XI
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 ESTADO DEL ARTE.	3
2.1 SITUACIÓN ACTUAL.....	3
2.1.1 CÁMARAS COMERCIALES.	4
2.1.2 CÁMARAS PERTENECIENTES A CENTROS DE INVESTIGACIÓN.	5
2.1.3 CÁMARAS ISA-UC3M.....	10
2.2 PROYECTO MEIGA-METNET.	12
3 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	17
3.1 ATMÓSFERA DE MARTE:	18
3.2 SENSOR ANALÍTICO DE POLVO EN SUSPENSIÓN.....	19
3.3 REQUISITOS.....	20
4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE POLVO.	22
4.1 DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR.	23
4.1.1 GRUPO 1: ESTRUCTURA INTERNA DE LA CÁMARA.....	24
4.1.2 GRUPO 2: DISPENSADORES.....	25
4.1.3 GRUPO 3: SISTEMA ENCARGADO DE CREAR EL FLUJO TURBULENTO.	27
4.1.4 GRUPO 4: BASE DE LOS SENSORES.	27
4.2 CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE POLVO.	28
4.2.1 ASPECTOS MECÁNICOS.	28
4.2.1.1 GRUPO 0: ESTRUCTURA EXTERNA DE LA CÁMARA.....	28
4.2.1.2 GRUPO 1: ESTRUCTURA INTERNA DE LA CÁMARA.	30
4.2.1.3 GRUPO 2: DISPENSADORES.....	32
4.2.1.4 GRUPO 3: SISTEMA ENCARGADO DE CREAR EL FLUJO TURBULENTO	33
4.2.1.5 GRUPO 4: BASE DE LOS SENSORES.	34
4.2.1.6 GRUPO 5: SISTEMA DE NITRÓGENO.	35
4.2.2 ASPECTOS DE INSTRUMENTACIÓN.....	36



4.2.2.1	CIRCUITO DE POTENCIA.	36
4.2.2.2	MEDIDA DE TEMPERATURA.	38
4.2.2.3	MEDIDA DE CONCENTRACIÓN DE POLVO.	40
5	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.	46
5.1	PUESTA A PUNTO.	46
5.2	TEST DE TEMPERATURA.	48
5.3	PRUEBA 1.	49
5.4	PRUEBA 2.	51
6	PRESUPUESTO.	53
6.1	COSTE DEL MATERIAL.	54
6.2	COSTE DEL PERSONAL.	56
6.3	COSTE TOTAL.	58
7	CONCLUSIONES	59
7.1	LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.	60
	BIBLIOGRAFÍA.	63
	ANEXOS.	66
A.1.	INSTRUCCIONES DE USO.	67
A.2.	CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS.	69
A.2.1.	CÁLCULO ESTRUCTURAL.	69
A.2.1.1.	ANÁLISIS GLOBAL	72
A.2.1.2.	VERIFICACIÓN	75
A.2.2.	CÁLCULO DE LA FUERZA DEL AIRE.	77
A.3.	PLANOS.	79



Índice de figuras.

Figura 1: Cámara de simulación MARTE (INTA-CSIC).....	6
Figura 2: Esquema del túnel de viento de la universidad de Arhus (Dinamarca).....	7
Figura 3: Cámara de simulación IWF (Austria).....	8
Figura 4: Cámara de simulación MEC (NASA).....	8
Figura 5: Cámara de simulación DEEP (NASA).....	9
Figura 6: Cámara de simulación de las NASA	10
Figura 7: Centro de investigación "Ames"(NASA)	10
Figura 8: Modelo CAD de la cámara del Departamento ISA. (a) Estructura externa. (b) Sistema dispensador de polvo	12
Figura 9: Detalle de la CSPM del proyecto REMS.	12
Figura 10: Esquema de la entrada y descenso de una estación MetNet en Marte.	14
Figura 11: Instrumentación de la sonda.	15
Figura 12: Logo del proyecto MEIGA	16
Figura 13: Flujo-grama de la metodología empleada	18
Figura 14: Fotografía de tormenta de polvo en Marte	19
Figura 15: Sensor de polvo MEIGA-MetNet. a) fotografía del sensor. b) esquema de la posición que ocupara en la sonda enviada a Marte.....	20
Figura 16: Estado de la cámara durante la realización de las pruebas	23
Figura 17: Estado final de la cámara.....	23
Figura 18: Modelo CAD de la estructura completa.....	24
Figura 19: Modelo CAD del grupo 1. a) estructura interna de la cámara. b) sistema de recolección de polvo.	25
Figura 20: Modelo CAD inicial del sistema de difusión de polvo	26
Figura 21: Modelo CAD final del sistema de difusión de polvo	26
Figura 22: Modelo CAD del sistema de sujeción de los ventiladores	27
Figura 23: Modelo CAD del sistema de sujeción de los distintos sensores.....	28
Figura 24: Estructura externa de la cámara. a) Congelador Zanussi ZFC-50 JF ARCON. b) Dimensiones internas del refrigerador, cotas en mm	29
Figura 25: Perfil de aluminio empleado para la estructura interna	31
Figura 26: Sistemas de unión entre perfiles.	31



Figura 27: Detalle de una tuerca deslizante utilizada como sistema de fijación.	32
Figura 28: Detalle del sistema de difusión de polvo.	33
Figura 29: Detalle sistema generador flujo turbulento	35
Figura 30: Detalle de la base de los sensores.....	35
Figura 31: Detalle de bombona (izquierda) y válvula (derecha) del sistema de nitrógeno.	36
Figura 32: Detalle de los pasacables y conectores empleados.....	37
Figura 33: Conexión de ventiladores. a) configuración serie-paralelo. b) configuración serie.	38
Figura 34: Registrador de datos de termopar de ocho canales TC-08.....	39
Figura 35: Termopares tipo K. (a) Conexión exterior de los termopares. (b) Detalle de uno de los termopares en interior de la cámara.....	39
Figura 36: Instrumentación empleada en la adquisición de datos de concentración de polvo.	41
Figura 37: Tensión de salida del GP2Y1010AUOF de SHARP. a) Forma de onda de la tensión de salida del sensor y de la corriente de entrada del led. b) Relación entre tensión de salida densidad de polvo en suspensión.	41
Figura 38: a) Entradas y salidas del sensor de polvo. b) Forma de onda de la entrada "LED".	43
Figura 39: Interface gráfica del programa capturador de datos.....	44
Figura 40: Detalle de las graficas obtenidas con el osciloscopio: a) Sensores saturados. b) Sensores no saturados.....	45
Figura 41: Detalle del sistema de detección de fugas	47
Figura 42: Detección de escapes. a) Fuga en la tapa. b) Fuga de los pasacables	47
Figura 43: Test temperatura	48
Figura 44: Distribución del polvo tras la realización de la prueba.....	50
Figura 45: Resultados prueba 1.	50
Figura 46: Detalle del difusor con cepillo tras la realización de la prueba.	51
Figura 47: Resultados prueba 2. Izquierda datos del primer sensor y derecha los del segundo sensor.....	52
Figura 48: Diagrama de Gantt	54
Figura A2.1. Cargas a soportar	71
Figura A2.2. Perfil tipo.....	72



Figura A2.3. Asignación de los nodos	72
Figura A2.4. Diagrama de esfuerzos axiles.....	74
Figura A2.5. Diagrama de momentos flectores en la Placa Base	74
Figura A2.6. Diagrama de momentos flectores en la Placa Base	75
Figura A2.7. Fuerzas ejercidas en el interior del difusor	78



Índice de tablas.

Tabla 1: Resolución y escala de los distintos tipos de termopares	39
Tabla 2: Coste del material.....	54
Tabla 3: Coste equipos.	55
Tabla 4: Duración del proyecto y personal empleado.	57
Tabla 5: Coste total en mano de obra.	57
Tabla 6: Coste total del proyecto.....	58
Tabla A2.1 Propiedades de la sección resistente.....	72
Tabla A2.2 Flecha vertical relativa de la pluma.....	73



Acrónimos.

AIBU: Additional Inflatable Braking Unit.

AM: Amplitud Modulada.

CA: Corriente Alterna.

CAD: Computer Aided Design.

CC: Corriente Continúa.

CSIC: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

CSPM: Cámara de Simulación de Polvo Marciano.

DS: Dust Sensor.

ESA: European Space Agency.

FM: Frecuencia Modulada.

FMI: Finnish Meteorological Institute.

GPIB: General Purpose Interface Bus.

IBU: Inflatable Braking Unit.

IKI: Russian Space Research Institute.

INTA: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

ISA: Ingeniería de Sistemas y Automática.

IVA: Impuesto sobre el Valor A adido.

LA: Lavochkin Association.

LAN: Local Area Network.

LCD: Liquid Crystal Display.

LED: Light Emitting Diode.

MarSLab: Mars Simulation Laboratory.

MEC: Mars Electrostatics Chamber:

MEIGA: Mars Environmental Instrumentation for Ground and Atmosphere).

MER: La Mars Exploration Rover.

MetNet: Meteorological Network.

MNL: MetNet Lander.

MSC: Mars Simulation Chamber.

MSL: Mars Science Laboratory.



MMPM: MetNet Mars Precursor Mission.

MNL: MetNet Lander.

MWIR: Medium Wavelength Infrared.

NASA: National Aeronautics and Space Administration.

PWM: Pulse Width Modulation

REMS: Rover Environmental Monitoring Station.

SMA: Shape Memory Alloy

UC3M: Universidad Carlos III de Madrid.

USB: Universal Serial Bus.

UV: Ultra Violet.



Capítulo 1.

1 INTRODUCCIÓN.

Este proyecto de fin de carrera surge como apoyo al proyecto europeo MEIGA-MetNet; concretamente en el desarrollo del sensor de polvo, que posteriormente viajara a Marte. El Objetivo principal de este proyecto es crear, dentro de un espacio cerrado, las condiciones de polvo de la atmósfera de Marte, con la finalidad de calibrar un sensor de polvo desarrollado por la empresa Arquimea ingeniería s. l. en colaboración con la universidad Carlos III de Madrid. Para este fin es necesario mantener dicho espacio a bajas temperaturas, seco, limpio y opaco en una atmósfera inerte, para posteriormente crear una nube de polvo que sirva para la calibración. El test consistirá en verificar si el sensor en cuestión es capaz de medir la concentración de polvo en suspensión. Para corroborar las medidas tomadas se dispondrá de sensores comerciales anteriormente probados.

En su elaboración, se ha utilizado un congelador industrial de grandes dimensiones como estructura de la cámara, garantizando así el enfriamiento y el aislamiento, instalando a su vez ventiladores situados estratégicamente para



distribuir homogéneamente el polvo y además se ha pintado de negro mate para obtener opacidad. Finalmente, se han creado una atmósfera inerte dentro de la cámara, inyectando n tr geno gaseoso, para limpiar y secar el ambiente. Se utilizó polvos de talco para las pruebas de validación, mientras que para la calibración se utilizara polvo de corindón de dimensiones del orden de las unidades de micras.

Para terminar, comentar que la memoria del proyecto se desarrolla en siete capítulos, en cada uno de los cuáles se desarrolla un tema fundamental en la realización de dicho proyecto. En este primer capítulo se trata de plantear una pequeña introducción que establezca una base para una mejor comprensión del resto del proyecto. Posteriormente, haremos una breve introducción a las cámaras de polvo existentes, repasaremos sus inicios y a su vez, comentaremos su situación en la actualidad. En el tercer capítulo se realiza una breve descripción del sensor al que da soporte esta cámara y los requisitos, los cuales serán los que nos sirvan de patrón durante el resto del proyecto. En el cuarto capítulo, se explica con detalle los procedimientos de diseño, construcción y validación que se llevaron a cabo. En el quinto capítulo, se abordan las pruebas ejecutadas, sus resultados y decisiones tomadas tras su realización. En el sexto capítulo se presenta un presupuesto aproximado de la realización de este proyecto. En el séptimo y último capítulo se plasman las conclusiones a las que se llegan al final de la realización del proyecto y se comentan las posibles líneas futuras.

Capítulo 2.

2 ESTADO DEL ARTE.

En esta sección se realizará una pequeña descripción de algunas de las cámaras de polvo existentes actualmente, así como una introducción del proyecto MEIGA, perteneciente a su vez a la misión MetNet, al que dará soporte la cámara presentada en los siguientes capítulos.

2.1 SITUACIÓN ACTUAL.

En la actualidad no se suelen encontrar cámaras de simulación dedicadas exclusivamente al polvo marciano, sino que éstas intentan simular al completo la atmósfera de Marte incluyendo presión, temperatura e incluso los gases más comunes presentes en su atmósfera, siendo construidas según las necesidades de la empresa que las vaya a utilizar. Por otro lado, están las cámaras de polvo terrestre, las cuales no necesitan que las partículas estén cargadas electrostáticamente, ya que pretenden probar el efecto corrosivo, principalmente de la arena o la estanqueidad en los productos desarrollados por su empresa, pudiéndose encontrar multitud de cámaras de este tipo distribuidas comercialmente. A continuación se realizará una breve descripción

de las cámaras existentes, tanto las comerciales como las diseñadas específicamente para un fin determinado, así como las creadas anteriormente por el departamento de Ingeniería de sistemas y automática (ISA) de la Universidad Carlos III de Madrid. Para una explicación más detallada consultar la bibliografía disponible.

2.1.1 CÁMARAS COMERCIALES.

Estas cámaras surgen para suplir el estudio del efecto nocivo producido por el polvo en los aparatos, instrumentos, automatismos, luminarias y envoltentes, en general expuestas a la intemperie; sus aplicaciones fundamentales se encuentran en la industria eléctrica y electrónica, iluminación, aeronáutica, automoción, defensa, etc. Las cámaras para ensayos de estanqueidad al polvo suelen ser compactas, sin límite de tamaño, las cuales admiten diferentes composiciones del polvo empleado; opcionalmente, se pueden instalar grupos de vacío para generar los diferentes grados de depresión en el interior de las envoltentes, con el fin de analizar los puntos más vulnerables a la penetración(1). Algunas de estas empresas son:

- CCI (Sociedad Española para el Control de Calidad e Instrumentación, S.L.) (2).
- ASTER (3).
- Envirotronics (4).
- WEISS THECNIK (5).
- Testing Europe (6).
- North American Envirosystems (7).
- CM Envirosystems (8).

No se exponen las características de sus cámaras, puesto que la principal diferencia entre ellas, de las características expuestas, son la forma y el tamaño. Dejando omitido en sus respectivas características el sistema de difusión de polvo empleado.

2.1.2 CÁMARAS PERTENECIENTES A CENTROS DE INVESTIGACIÓN.

Como se citó anteriormente, no existen cámaras dedicadas exclusivamente a la simulación del polvo marciano, sino que intentan reproducir más de una característica de la atmósfera de Marte. A continuación se presentarán algunas de las cámaras de simulación de polvo marciano pertenecientes a centros de investigación:

- MARTE: La cámara de simulación MARTE (Figura 1), se encuentra en el centro de Astrobiología (INTA-CSIC). Está especialmente diseñada para estudiar condiciones marcianas e introducir muestras electrónicas reales. Para ello, se puede modificar la temperatura en el portamuestras en un rango entre 80 K y 450 K y además, es capaz de modificar la temperatura ambiental entre 200 K y 400 K y de generar “tormentas de polvo” en su interior. El principal objetivo de esta cámara, es la de probar nuevos dispositivos electromecánicos “sensores”, por lo que su ámbito de aplicación se destina principalmente a la calibración de sensores e instrumentación ambiental que serán enviados al espacio en futuras misiones espaciales. En cuanto a la atmósfera de MARTE, el interior cuenta con unos anillos refrigeradores de nitrógeno líquido, que en función de la presión y la composición de la atmósfera, permite enfriar la misma, no sólo por radiación, sino también por conducción y convección. Además, la cámara, está diseñada y construida para poder generar tormentas de polvo en su interior mediante un ingenioso sistema de deposición, que mediante la combinación de un tamiz vibratorio, la gravedad y la diferencia de presiones, es capaz de producir una niebla de polvo de partículas de hierro, similar a las de Marte. Todo este complejo sistema se ha desarrollado para testear los sensores de la estación meteorológica REMS (Rover Environmental Monitoring Station), de la

misión MSL (Mars Science Laboratory) de la NASA, así como otros proyectos para la ESA, como ExoMars (9).

- Instalaciones Marslab (Mars Simulation Laboratory): El Laboratorio de Simulación de Marte de la universidad de Arhus (Dinamarca), es un conjunto de instalaciones de análisis construido por un equipo de investigación interdisciplinario de biólogos, químicos, geólogos y físicos que trabajan juntos en la investigación del planeta Marte. Estos laboratorios poseen un túnel de viento (Figura 2), que puede trabajar bajo condiciones de la superficie del medio ambiente marciano, y crear una tormenta de polvo. Este túnel de viento se complementó con una bio-cámara especialmente construida para experimentos biológicos a largo plazo, bajo condiciones atmosféricas similares a las de Marte, y con dos pequeñas cámaras de atmósfera controlada para la industria química y física. Con el propósito de obtener información sobre el flujo, la carga, la adherencia y la cohesión del polvo marciano dispone de la instrumentación adecuada para el seguimiento de estos parámetros. Es importante destacar que este sistema permite que la atmósfera pueda ser controlada y vigilada. Las velocidades típicas del viento son de 0 a 10 m/s y pueden ser reproducidos con la densidad variable de polvo. Un sistema de refrigeración de nitrógeno líquido permite alcanzar las bajas temperaturas de Marte(10).



Figura 1: Cámara de simulación MARTE (INTA-CSIC).

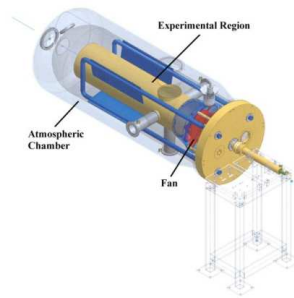


Figura 2: Esquema del túnel de viento de la universidad de Arhus (Dinamarca),

- “IWF space simulation chamber”: La cámara IWF (Figura 3) pertenece al instituto de investigaciones especiales de la academia de las ciencias de Austria en Graz. La cámara fue utilizada en la realización de los experimentos para determinar las propiedades termomecánicas de la sublimación de residuos en la misión Rosetta llevada a cabo por la ESA. También se utilizará en futuras investigaciones sobre polvo marciano y exposiciones a rayos UV en proyectos de astrobiología desarrollados también por la ESA. Esta cámara permite simular entornos de entre 10^{-5} mbar a 1bar de presión y alcanzar con nitrógeno líquido los 100K, temperatura suficiente para simular el entorno de Marte. Presenta unas dimensiones de 40 x 40 cm(11).
- MEC (Mars Electrostatics Chamber): La cámara electrostática de Marte (Figura 4) pertenece al banco de pruebas del Laboratorio de Física electromagnética de la NASA en el centro espacial Kennedy. Es una cámara de vacío cilíndrica con un volumen de $1,5 \text{ m}^3$. Fue diseñado para simular las condiciones ambientales de Marte para realizar estudios electrostáticos, así como para otras áreas de investigación. Se utiliza para caracterizar la interacción electrostática entre partículas simuladas de polvo marciano y diferentes materiales que puedan ser utilizados en futuras misiones a Marte. La cámara simula una temperatura y una humedad semejantes a las que hay en Marte, así como una composición

atmosférica para diferentes latitudes del planeta y en diferentes estaciones. Permite cargar el polvo electrostáticamente, así como, simular entornos cuya presión vaya de los 0,3 mbar a 1bar y una temperatura que oscile entre los 150K y los 473K(12).

- “The DEEP Chamber” (Figura 5): Esta cámara perteneciente a la NASA es una herramienta para caracterizar el efecto del polvo marciano y lunar en las superficies de mecanismos sensibles a la degradación, en la instrumentación, la óptica, etc. También proporciona a los científicos un lugar para la prueba a las teorías sobre cómo viaja el polvo, sobre todo en la superficie lunar. Las instalaciones son de 1,2 metros de diámetro y 1,8metros de longitud, siendo significativamente mayor que las instalaciones de polvo que funcionan en otros centros de la NASA (13).



Figura 3: Cámara de simulación IWF (Austria)



Figura 4: Cámara de simulación MEC (NASA).



Figura 5: Cámara de simulación DEEP (NASA)

- MSC (NASA): La “Mars Simulation Chamber” (MSC) de la NASA, surgió para la realización de experimentos con polvo atmosférico en Marte con objeto de estudiar sus características, con el fin de comprobar si puede ser útil para mantener con vida microorganismos terrestres en la superficie del planeta. Para el experimento se utilizó radiación ultravioleta y se simularon entornos muy secos y con alto contenido en sales (similar a la superficie marciana), llegando a los 50º bajo cero y a unas presiones atmosféricas cercanas a 140 veces menores que al nivel del mar(14).
- Centro de investigación “Ames” de la NASA: Está situado en el Valle del Silicio (California). El laboratorio cuenta con dos equipos para estudiar cómo los vientos y remolinos de polvo pueden afectar el paisaje y el medio ambiente de Marte. El “Mars Surface Wind Tunnel” simula los vientos marcianos “normales”, mientras que el “Vortex Generator” simula los torbellinos de polvo diablos. En el interior del túnel de viento se baja la presión para simular la presión de la atmósfera de Marte a nivel del suelo. Debido a las diferencias gravitacionales entre Marte y la Tierra, utilizan a menudo el polvo de cáscara de nuez para simular el polvo de Marte. Los científicos también utilizan arena de la playa, dióxido de cromo (similar al grano del papel de lija) y la harina de sílice, así como una variedad de otros materiales para simular diferentes tamaños y densidades de partículas(15).

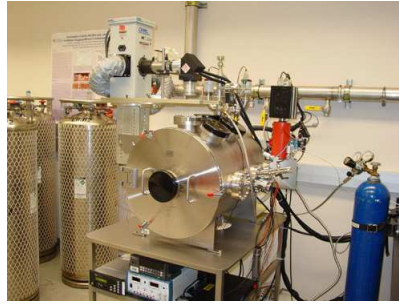


Figura 6: Cámara de simulación de las NASA



Figura 7: Centro de investigación "Ames"(NASA)

Existen otras cámaras de simulación de la atmósfera de Marte como la cámara de simulación de Marte de ESTEC (MSC), pero que carecen de la simulación del polvo. La MSC de ESTEC está siendo utilizada en colaboración entre la ESA y la Universidad de Leiden con el apoyo de los laboratorios de ESTEC. Ha sido desarrollada para ejecutar simulaciones de soporte para las misiones planetarias de la ESA, con especial énfasis en entornos marcianos. Posee un simulador solar de 1KW con lámpara de Xenón que provee el espectro similar al solar, 2 lámparas de deuterio que emiten rayos UV de 200 a 250nm, un sistema de refrigeración interna que provee temperaturas de los 90 a los 330 y un sistema humidificador(16).

2.1.3 CÁMARAS ISA-UC3M.

Existen dos cámaras de polvo desarrolladas anteriormente por la UC3M. La primera de ellas está compuesta por dos partes; una superior donde estará colocado el sensor y otra inferior donde se encuentran los mecanismos que generan la nube de polvo. Para esta labor, el polvo será expulsado a la parte

superior a través de un tubo utilizando un cepillo comercial. Este cepillo es accionado por un motor, que generando un movimiento de rotación, agita y direcciona el polvo hacia el tubo que luego transportará éste al lugar donde se ubica el sensor. Al final del tubo transportador se encuentra una rejilla cargada eléctricamente, por donde el polvo se cargará al pasar, generando las condiciones necesarias para la simulación. La Figura 8a muestra un modelo CAD de la cámara de polvo marciano. Las dimensiones generales de ésta son 400mm de diámetro y 500 mm de altura. El proyecto mecánico de la cámara de polvo marciano está compuesto por grupos de sub-ensamblajes que juntos generan el ensamblaje final. El sistema difusor de polvo, Figura 8b consiste en una cajetilla provista de un mecanismo, que acciona el cepillo encargado de dispersar el polvo por el interior de la cámara(17).

Por otro lado está la cámara de simulación de polvo marciano (CSPM), que formó parte del proyecto REMS (Rover Environmental Monitoring Station), consiste en una plataforma de pruebas para un prototipo de sistema de limpieza de partículas de polvo depositadas sobre la lente de un sensor UV, ubicado en el módulo principal del vehículo. Con este fin se ideó una urna de policarbonato, en cuyo interior se simulan las condiciones de viento, vapor de agua y radiación ultravioleta existentes en la superficie de Marte. Igualmente efectúa el control de los parámetros relativos a la humedad y a la cantidad de polvo depositado en el dispositivo, también permitir la carga electroestática de las partículas de polvo. Para lograrlo dispone de un entorno controlado y aislado del exterior, así como los sistemas de suministro controlado de polvo, de control de humedad, de suministro de luz UV y de medición láser de cantidad de polvo depositado. El sistema de difusión de polvo lo forman dos turbinas selladas de corriente continua que permiten la generación de un flujo de aire gracias al sistema de recirculación de aire presente en la cámara(18). En la Figura 9, se observa una imagen del prototipo empleado durante las pruebas, así como el diseño CAD.

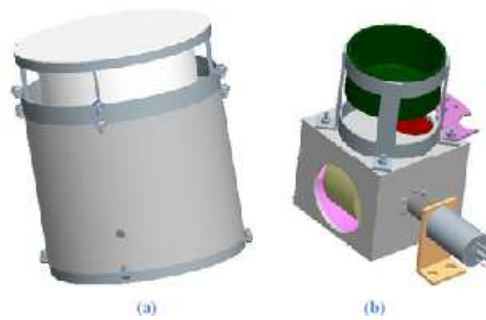


Figura 8: Modelo CAD de la cámara del Departamento ISA. (a) Estructura externa. (b) Sistema dispensador de polvo



Figura 9: Detalle de la CSPM del proyecto REMS.

2.2 PROYECTO MEIGA-METNET.

El proyecto MetNet es una misión científica iniciada y definida por el Instituto Meteorológico de Finlandia (FMI), para el estudio de la atmósfera de Marte. En su realización intervienen, incluido el FMI, la Asociación Lavochkin (LA), el Instituto de Investigaciones Espaciales de Rusia (IKI) y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). La misión incluye el envío de varias decenas de MNLs (módulos de aterrizaje) en la superficie marciana. El objetivo es establecer una red de observación extendida en la superficie de Marte para investigar la estructura física del planeta, la atmósfera y la meteorología. El hecho de que tanto la meteorología en particular, y la climatología en general, varían tanto temporal como espacialmente, significa que el medio más eficaz de seguimiento de estos es hacer medidas simultáneas en varios lugares y durante un período tiempo suficientemente largo. Teniendo esto en cuenta, MetNet incluye una red de múltiples puntos de sondas de superficie

complementadas por un satélite en órbita de apoyo. Entre diez y veinte puntos de observación se consideran como mínimo para obtener una buena visión de los fenómenos atmosféricos en toda la escala planetaria(19).

La idea principal detrás de la sonda MetNet Lander (MNL) es la ausencia de un escudo térmico tradicional, permitiendo reducir la masa de las sondas a 19 kg cada una, de los cuales 2,5 kg están reservados a la carga útil. Estas sondas utilizan un escudo térmico neumático desplegable (denominado Inflatable Braking Unit, IBU) de un metro de diámetro para la entrada en la atmósfera. Cuando la velocidad descienda lo suficiente, se desplegará un faldón aerodinámico de 1,8 metros de diámetro denominado AIBU (Additional Inflatable Braking Unit), que reducirá la velocidad de descenso y estabilizará al vehículo. El escudo térmico IBU se desprenderá una vez en la atmósfera marciana y la sonda impactará contra el suelo a gran velocidad (45-58 m/s, dependiendo de la altura de la zona de aterrizaje). Por este motivo, la carga útil estaría situada dentro de una sonda penetradora especialmente diseñada para aguantar el impacto. El faldón del AIBU debe evitar además que la sonda se entierre a una profundidad excesiva, impidiendo las comunicaciones con la Tierra. En la Figura 10 se presente un esquema del descenso de la sonda. El uso de estructuras inflables para la entrada y descenso en una atmósfera planetaria constituyen la principal novedad tecnológica de esta misión y la convierten en un banco de pruebas para futuras misiones interplanetarias de bajo coste(20). Debido a su novedad, se decidió desarrollar antes una misión precursora, consistente en una única estación, estando previsto su lanzamiento para 2011, que será lanzada junto con la sonda rusa Phobos-Grunt, llamada MetNet Mars Precursor Misión (MMPM) (21). La MMPM es una misión internacional que cuenta con la participación de España, además de Finlandia y Rusia. La contribución clave de la misión precursora es demostrar la viabilidad del nuevo concepto de vehículo de aterrizaje, así como la toma de imágenes (nuevas y de alta resolución) y datos meteorológicas (22).

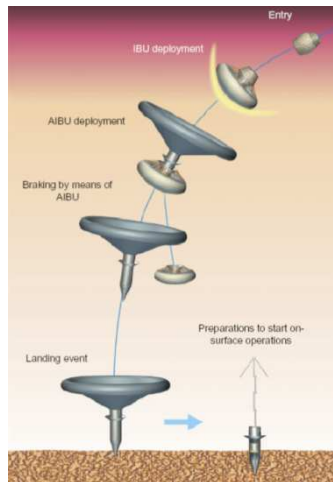


Figura 10: Esquema de la entrada y descenso de una estación MetNet en Marte.

La carga científica útil de la misión MetNet abarca toda la instrumentación empleada en la recolección de los datos necesarios para el estudio de la atmósfera de Marte. Irá acoplada según se aprecia en la Figura 11 y estará compuesta por:

1. Dispositivos atmosféricos:
 - MetBaro - Instrumento de presión (proporcionado por el FMI).
 - MetHumi - Instrumento de humedad (proporcionado por el FMI).
 - Acelerómetro (proporcionado por el IKI).
 - Sensores de temperatura (proporcionado por el IKI).
2. Dispositivos ópticos:
 - PanCam - Cámara Panorámica (proporcionado por el IKI).
 - MetSIS - Sensor de radiación solar (proporcionado por el INTA).
 - DS - Sensor de polvo (proporcionado por el IKI).
3. Dispositivos para la composición y la estructura:
 - MOURA – magnetómetro triaxial (proporcionado por el INTA).
 - Acelerómetro (proporcionado por el IKI).

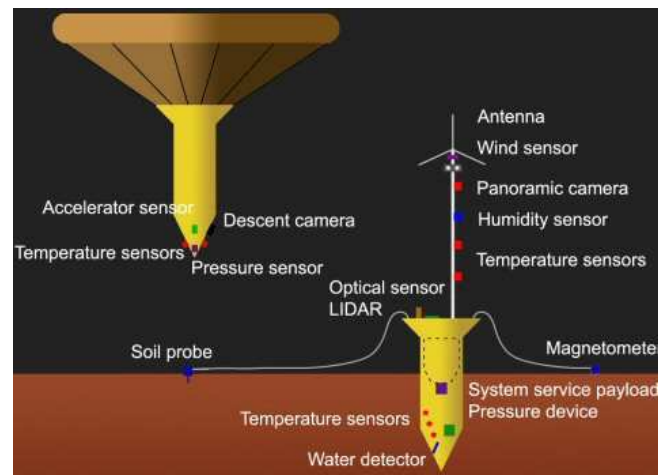


Figura 11: Instrumentación de la sonda.

PROYECTO MEIGA

La misión MEIGA (Mars Environmental Instrumentation for Ground and Atmosphere) es un proyecto del Ministerio de Ciencia e Innovación. Forma parte del proyecto MetNet (Meteorological Network), explicado anteriormente. En ella participan miembros de las instituciones españolas como el INTA, la Universidad Carlos III de Madrid, Arquimea, el Instituto de Astrofísica de Andalucía y la Universidad Complutense entre otros. Esta será la primera misión a Marte con bandera española (Figura 12), es decir, con participación científica y desarrollo propio. Si la parte científica está liderada por la Universidad Complutense de Madrid, la tecnológica lo está desde el INTA (23). La carga española supone un veinte por ciento de la carga útil total y aporta algunos de los instrumentos que permitirán estudiar la meteorología de Marte. Los objetivos de este proyecto son(24):

- Estudio de la capa límite atmosférica.
- Estudio de la radiación en la superficie.
- Estudios del campo magnético en superficie.
- Estudios geodésicos y caracterización de los eclipses de las lunas de Marte.

Para lograrlo incorporara cargas útiles en la MMPM, la instrumentación que se lleva a cabo consta de sensor de irradiancia Solar, un magnetómetro, un sistema de comunicación sin cables y un sensor para medir el polvo en suspensión.



Figura 12: Logo del proyecto MEIGA

Capítulo 3.

3 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.

Este proyecto consiste en diseñar una cámara capaz generar una nube polvo. La finalidad de esta, es testar el funcionamiento de un sensor de polvo, perteneciente al proyecto MEIGA-MetNet, que posteriormente será incorporado en una plataforma enviada a Marte. El test consistirá en verificar si el sensor es capaz de medir la concentración de polvo en suspensión, para ello, se dispondrá de sensores comerciales que corroborarán los datos obtenidos. Para la correcta realización de este proyecto se siguió la metodología de trabajo resumida en la Figura 13. Como podemos observar, en primer lugar se analizaron los requisitos, así como los recursos de los que se disponían. Una vez se realizó dicho análisis, se procedió al diseño y posterior fabricación de la cámara. Una vez fabricada se realizaron las pruebas, en las cuales tras la detección de algún fallo, se procede al rediseño para su solución. Posteriormente se procedió a otra prueba, realizándose este ciclo tantas veces como fueron necesarias para la correcta validación de la cámara.

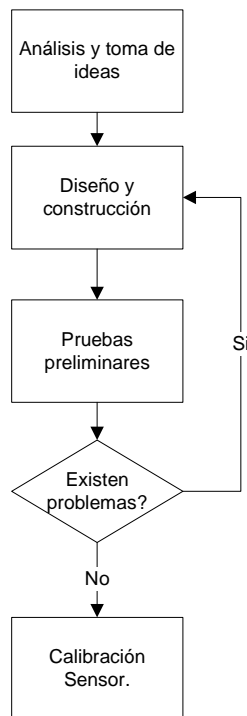


Figura 13: Flujo-grama de la metodología empleada

A continuación se abordará una breve descripción de la atmósfera de Marte, del sensor de análisis de polvo en suspensión al que dará soporte la cámara, así como los requisitos de la misma.

3.1 ATMÓSFERA DE MARTE:

Marte tiene una masa muy pequeña (10% de la masa terrestre) y un radio sensiblemente menor, por lo que su gravedad superficial es aproximadamente 1/3 de la terrestre. La atmósfera marciana es muy tenue (100 veces menos densa que la terrestre) y se compone principalmente de dióxido de carbono siendo la proporción de vapor de agua sensiblemente inferior a la terrestre. Por otro lado, la presión superficial varía según la época del año. Durante el invierno marciano, parte de la atmósfera (30%) se condensa en los casquetes polares. (25). La temperatura de la superficie de Marte varía desde un mínimo de alrededor de 140K durante los inviernos polares, a máximos de 300K en verano(26). Además, en Marte son tan frecuentes las tormentas de polvo que pueden durar incluso meses (Figura 14).



Figura 14: Fotografía de tormenta de polvo en Marte

La atmósfera marciana contiene una carga significativa de polvo en suspensión. Según datos recogidos por la misión MER (La Mars Exploration Rover), se observaron distribuciones de tres componentes de partículas de polvo (27): Partículas de 1-2 micras de radio, que permanecen suspendidas en la atmósfera durante largos períodos. El polvo en suspensión tiene propiedades magnéticas, ya que está integrado principalmente por partículas de sílice (28). Partículas mayores de 10 micras de radio, que se elevan por acción del viento, asentándose fuera de la atmósfera. Los depósitos en la superficie de estas partículas son significativamente mayores que los medidos en la atmósfera. Y por último las partículas de 80 micras, que se mueven principalmente por saltación(29).

3.2 SENSOR ANALÍTICO DE POLVO EN SUSPENSIÓN.

El sensor analítico de polvo en suspensión forma parte del proyecto MEIGA-MetNet, explicado con anterioridad en el Capítulo 2 (por motivos de confidencialidad, únicamente se realizará una breve descripción del sensor). Este llevará a cabo mediciones de polvo en la capa límite de Marte. Se compone de un conjunto de detectores de infrarrojos, un emisor de infrarrojos, ambos trabajando en la banda MWIR y un actuador de SMA. Durante la misión, el instrumento actúa como un sensor activo, y llevará a cabo mediciones del polvo en suspensión. La función del actuador es proporcionar un cuerpo negro de referencia al detector para la calibración(30). El desarrollo de este dispositivo corre a cargo de la UC3M y de Arquimea.

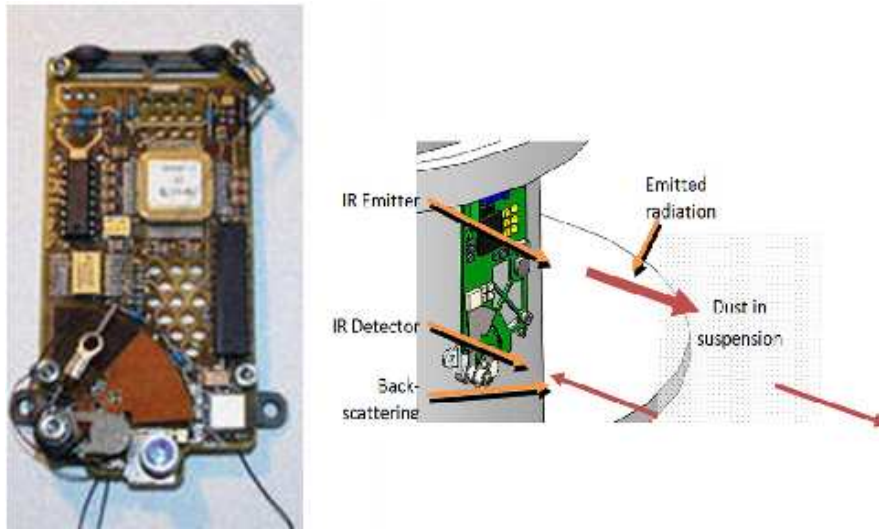


Figura 15: Sensor de polvo MEIGA-MetNet. a) fotografía del sensor. b) esquema de la posición que ocupara en la sonda enviada a Marte.

3.3 REQUISITOS.

Atendiendo a las especificaciones requeridas por el sensor, para el cual se fabrica esta cámara (Se omiten dichas especificaciones por motivos de confidencialidad), se deben tener en cuenta los siguientes requisitos, para el correcto diseño y posterior fabricación de la cámara:

- Estructura opaca de al menos 1m de longitud. Según pruebas confidenciales realizadas anteriormente por Arquimea, debe existir por lo menos 1 metro de distancia entre el sensor y las paredes de la cámara para evitar reflejos indeseables que el receptor pueda medir. Para reducir dicha distancia se puede diseñar una trampa de luz o usar una pintura con una emisividad (ϵ) cercana lo más posible a 1 (cuerpo negro). Deberá a su vez poderse variar la distancia entre sensor y pared de la cámara para distintas pruebas del sensor.
- Sistema de refrigeración de hasta -20 C. Aunque se estiman temperaturas inferiores a -20°C en la atmósfera de Marte, para la correcta calibración del sensor por el que se construye esta cámara, bastaría con un enfriamiento de -20°C , siendo conveniente enfriar toda

la cámara para evitar que las superficies calientes emitan fotones indeseables que el receptor pueda medir.

- Atmósfera inerte. Requisito indispensable para la correcta calibración del sensor, dado que la humedad podría dañar el mismo, al aumentar el riesgo de congelamiento.
- Debe de ser un sistema hermético y aislado térmicamente.
- Distribución homogénea del polvo.
- Se dispone de un presupuesto máximo de 2000€ (exceptuando mano de obra)
- Ser capaz de utilizar polvos con tamaños de partículas comprendidos entre 10 μm y 1 μm , dado que es el tamaño de partícula que se estima encontrar en Marte.
- Carga electrostática: cargar electrostáticamente el polvo no es necesario, pero podría ser conveniente para aproximarse a las condiciones de Marte lo máximo posible.

Cumpliendo los anteriores requisitos, se estaría en capacidad de calibrar adecuadamente el sensor de polvo.

Capítulo 4.

4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE POLVO.

En este capítulo se describirán los diseños realizados, así como el proceso de construcción empleado, incluyendo los rediseños efectuados, ya sean estos por motivos económicos o por problemas detectados en las pruebas realizadas. Una vez diseñadas, fabricadas y montadas las piezas, éstas se fijaron en la estructura interna, y posteriormente se posicionaron en el interior de la máquina frigorífica. Con lo que tras la colocación de la instrumentación necesaria para la validación y posterior calibración del sensor, se estuvo en disposición de empezar las distintas pruebas. El resultado de estas, produjeron el rediseño de los dispensadores. En la Figura 16 se contempla la apariencia de la cámara durante la realización de las pruebas. Al finalizar las distintas pruebas se aplicaron dos capas de pintura sobre las distintas superficies de la cámara, quedando esta tal y como se observa en la Figura 17. Todos los detalles de los distintos procesos se detallarán más adelante.



Figura 16: Estado de la cámara durante la realización de las pruebas



Figura 17: Estado final de la cámara.

4.1 DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR.

Los distintos diseños CAD se realizaron utilizando el programa de diseño Solid Works. Para una mayor comprensión de los diseños, estos se dividen en grupos dependiendo de la funcionalidad del mismo, en los anexos de este documento se encuentran los planos de fabricación de cada uno de los diseños. En la Figura 18 se observa el resultado final de la unión de los distintos grupos.

Consecutivamente se abordara una breve explicación de los diseños efectuados divididos en grupos, atendiendo a su funcionalidad.

4.1.1 GRUPO 1: ESTRUCTURA INTERNA DE LA CÁMARA.

Este grupo está compuesto por toda la estructura necesaria para sostener los sistemas de generación de flujo turbulento de aire y el sistema de suministro de polvo. Esta estructura dispone a su vez de una bandeja inferior para la recolección del polvo. Para su desarrollo se intentó incluir, en la medida de lo posible elementos comerciales, dado que estos reducen el precio y el plazo de entrega. Con lo que se optó por diseñar una estructura que se pudiese construir con perfiles comerciales. Atendiendo a las dimensiones internas del refrigerador donde se ubicará esta estructura, así como los distintos sistemas a acoplar en ella, se realizó el diseño de la Figura 19a.

Por otro lado se diseñó una bandeja para facilitar la recolección del polvo una vez terminada la prueba. La bandeja estará anclada a las partes de la estructura anteriormente explicada, siendo esta la que soporta todo el peso. En la Figura 19b se muestra el diseño de dicho sistema de recolección de polvo.

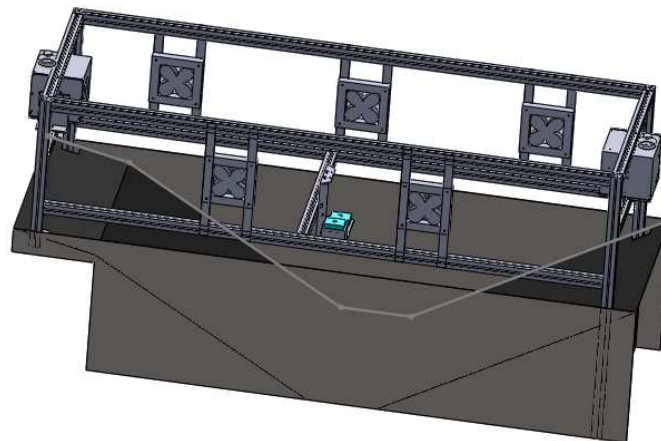


Figura 18: Modelo CAD de la estructura completa

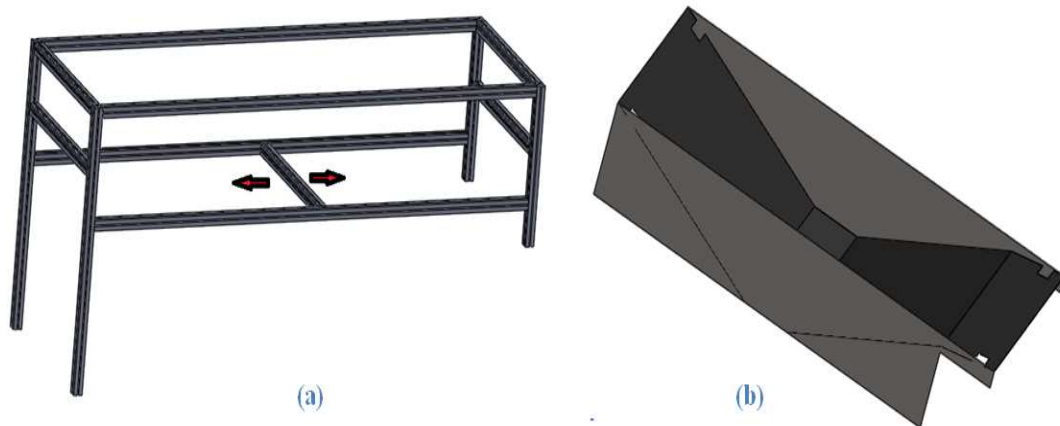


Figura 19: Modelo CAD del grupo 1. a) estructura interna de la cámara. b) sistema de recolección de polvo.

4.1.2 GRUPO 2: DISPENSADORES.

Inicialmente se pensó en el diseño de los dispensadores de la cámara representado en la Figura 20 (para su diseño se partió de los dispensadores anteriormente diseñados por el departamento de ingeniería de sistemas y automática de la UC3M), el cual contiene el mecanismo de accionamiento del cepillo, que posteriormente va a dispersar el polvo por la cámara. Este grupo se ensamblará con tornillos en la parte frontal y trasera de la estructura del grupo 1. Es posible visualizar en la Figura 20 una cajetilla que representa una pequeña sub-cámara donde estará girando el cepillo esparciendo el polvo. La finalidad de esta cajetilla es evitar que el polvo se disperse durante la creación del flujo turbulento dejando la dispersión del mismo a voluntad. Dentro de la cajetilla se encuentran dos piezas que van a servir como rampa para ayudar al cepillo a direccionar y expulsar correctamente el polvo hacia el interior de la cámara donde se habrá creado previamente un flujo turbulento. Un motor de corriente continua, se situará en la pieza situada a la izquierda de la cajetilla, la cual, al igual que la anterior, se ensamblará junto a la cajetilla al grupo 1, sirviendo como accionador del cepillo a través de un acople comercial. El eje del motor se apoyará en dos cojinetes reduciendo la fricción durante el funcionamiento de la cámara.

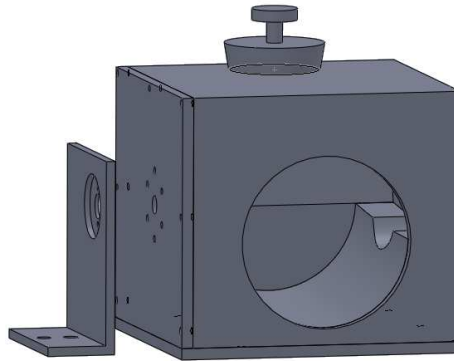


Figura 20: Modelo CAD inicial del sistema de difusión de polvo

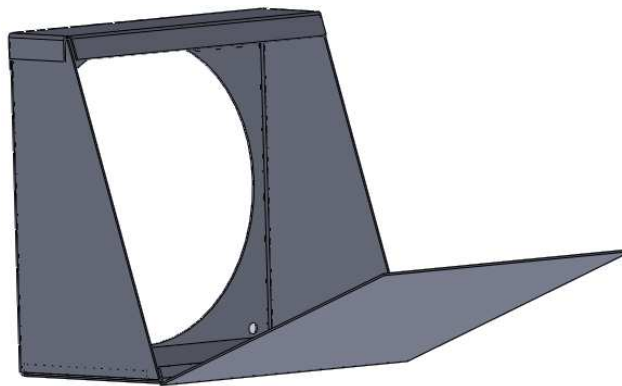


Figura 21: Modelo CAD final del sistema de difusión de polvo

Debido al elevado coste de fabricación, tras recibir la oferta del fabricante, y dado que el coste es un factor limitante en este proyecto, se rediseñó el sistema de difusión. En vez de utilizar este sistema (Figura 20), compuesto por una gran cantidad de piezas, se diseñó un nuevo grupo formado por 4 piezas a fabricar, una bisagra y un ventilador comercial. Estas piezas serían fabricadas por conformado de chapa en aluminio, reduciéndose el coste. Como se puede percibir de la Figura 21, este nuevo sistema formado por 6 componentes, consistirá en un pequeño recipiente en el que se mantendrá encerrado el polvo durante la creación del flujo turbulento. Una vez se ha creado dicho flujo, se procede a la activación del ventilador (el cual empujará la tapa), produciéndose la difusión del polvo, que se depositó previamente en su interior, hacia la totalidad de la cámara.

4.1.3 GRUPO 3: SISTEMA ENCARGADO DE CREAR EL FLUJO TURBULENTO.

La nube de polvo será formada a partir de la creación de un régimen de fluido turbulento dentro de la cámara. Dichas turbulencias se crearán mediante la utilización de ventiladores comerciales, con lo que se diseñó un sistema de sujeción para la colocación de los mismos. Como se aprecia de la visualización de la Figura 22, el sistema de sujeción está compuesto por dos piezas rectangulares, con cuatro taladros pasantes cada una, para acoplar los ventiladores y posteriormente anclar todo el conjunto a la estructura del grupo 1. Se diseñó de esta manera por su sencillez y versatilidad, dado que nos permite situar los generadores de flujo turbulento en la posición que se desee de los laterales de la estructura interna de la cámara.

4.1.4 GRUPO 4: BASE DE LOS SENSORES.

Como su propio nombre indica, el grupo 4 es una estructura que sirve de base tanto para el sensor óptico que se desea testar, como de los sensores ópticos de validación. Este grupo está formado por 3 piezas que se mandarán a fabricar a una empresa de mecanizado. Estarán unidas entre ellas por tornillos comerciales de métrica 4, y unidos a la estructura del grupo 1 por tornillos M6, situándose en la barra central de dicha estructura, la cual es móvil, permitiendo variar la distancia con las paredes de la cámara. En la Figura 23 se muestra el diseño CAD de la figura, simulando las piezas de color verde los sensores de validación.



Figura 22 Modelo CAD del sistema de sujeción de los ventiladores

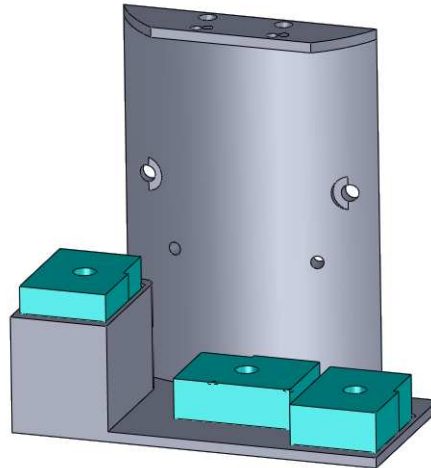


Figura 23: Modelo CAD del sistema de sujeción de los distintos sensores.

4.2 CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE POLVO.

En este apartado se abordarán los procedimientos y toma de decisiones que se ejecutaron para la construcción de la cámara, así como toda la instrumentación empleada para la validación de la misma.

4.2.1 ASPECTOS MECÁNICOS.

Para la construcción de la parte mecánica se intentó emplear, en la medida de lo posible, componentes comerciales debido a su bajo coste, en comparación con la fabricación personalizada de los mismos. Al igual que en el apartado 4.1, para una mayor comprensión de la mecánica tratada se divide el estudio en los subgrupos que se detallan en los siguientes subapartados.

4.2.1.1 GRUPO 0: ESTRUCTURA EXTERNA DE LA CÁMARA.

Para cumplir con las especificaciones estructurales de refrigeración y aislamiento de la cámara, se optó por la utilización de un congelador comercial. La Figura 24a muestra un congelador comercial Zanussi ZFC-50 JF ARCON que se utilizó para la estructura de la cámara. Las especificaciones de este congelador son:

- Dimensiones externas: 876 x 1600 x 665 mm (alto-ancho-fondo).

- Dimensiones internas: expuestas en la Figura 24 b.
- Poder congelación 20 Kg/24 h.
- Blanco.
- Clase B.
- Capacidad total bruta 500 L.
- Capacidad total neta 495 L.
- Sistema Low Frost.
- Evaporador oculto.
- Termómetro analógico.
- Cierre con llave.
- 3 cestos.
- Desagüe frontal.
- 1 compresor.
- Luz interior.
- Piloto de congelación rápida.
- Piloto de funcionamiento.
- Piloto de alarma.
- Alarma acústica.
- Ruedas.
- Autonomía 31 h.

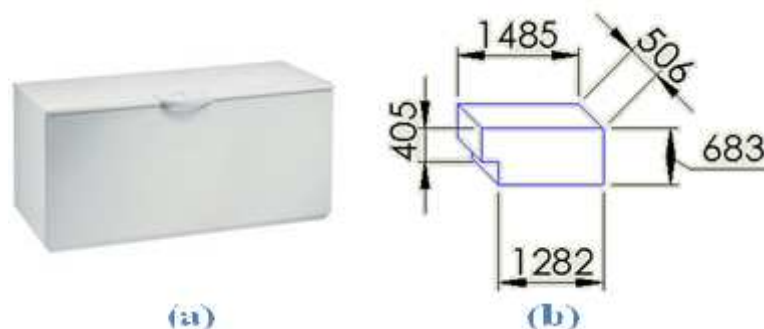


Figura 24 Estructura externa de la cámara. a) Congelador Zanussi ZFC-50 JF ARCON. b) Dimensiones internas del refrigerador, cotas en mm

Estos refrigeradores llegan a una temperatura de enfriamiento menor de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de manera uniforme en todo su interior, temperatura idónea para realizar una buena calibración del sensor de polvo que será probado, dado que es conveniente enfriar toda la cámara para evitar que las superficies calientes emitan fotones indeseables que el receptor pueda medir. Las dimensiones del refrigerador, como se puede observar en las especificaciones, son de más de 1m de longitud, distancia conveniente para evitar que los rayos que se escapan de la zona de medición de polvo se reflejen en las paredes, llegando al receptor perturbando la medida. Finalmente, los congeladores comerciales están diseñados para aislar tanto térmica, como herméticamente su interior, por lo tanto con esta estructura cumplimos también con este requisito. Para asegurar el aislamiento se aplicará silicona en las zonas necesarias, como por ejemplo en los pasacables.

4.2.1.2 GRUPO 1: ESTRUCTURA INTERNA DE LA CÁMARA.

Este grupo, como se mencionó anteriormente, está compuesto por toda la estructura necesaria para sostener los sistemas de generación de flujo de aire y el sistema difusor de polvo. Para su desarrollo se intentó incluir en la medida de lo posible elementos comerciales, dado que esto reduce el precio y el plazo de entrega. Con lo que se optó por construir una estructura adquiriendo 4 perfiles de aluminio de 30x30x3000mm como la que se muestra en la Figura 25, siguiendo el CAD que se diseñó con anterioridad y ejecutando los cortes para la obtención de las distintas piezas, aprovechando lo máximo posible el material. Se eligieron estos perfiles debido a su bajo coste y disponibilidad, comprobando previamente, que son capaces de soportar las cargas aplicadas en toda la estructura. Los resultados de este análisis se encuentran en el anexo 2, en el cual se muestran los distintos diagramas de momentos flectores, esfuerzos axiales y cortantes, con sus respectivos valores máximos. La unión entre perfiles se realiza con piezas cúbicas en las esquinas, especialmente diseñada para tal efecto y con escuadras de aluminio del mismo ancho que los

perfiles (podemos apreciar dichas piezas en la Figura 26). Por otro lado, la unión de los distintos componentes con la estructura se realizaron con tornillos de métrica 6, así como unas tuercas deslizantes específicamente diseñadas para este tipo de perfiles (Figura 27), con ello no sólo podemos sujetar, por ejemplo, la estructura de los ventiladores, sino que además al poderse deslizar las tuercas de sujeción entre los carriles de la estructura, nos proporciona una mayor flexibilidad a la hora de situar las distintas partes. Esta flexibilidad se aprovechará especialmente a la hora de colocar la base de los sensores ya que así podremos situarlos a distintas posiciones respecto de la pared. Para apoyar la estructura interna en el interior de la cámara, se compraron unas patas específicamente diseñadas para este tipo de perfiles.

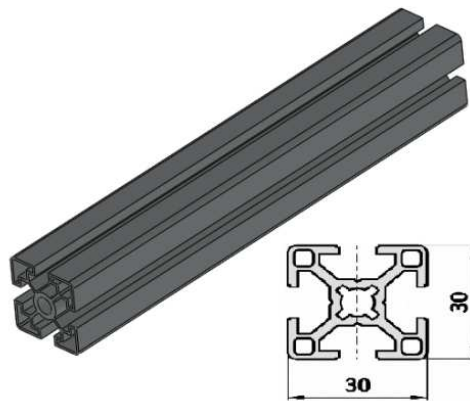


Figura 25: Perfil de aluminio empleado para la estructura interna



Figura 26: Sistemas de unión entre perfiles.

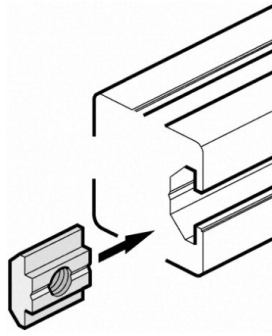


Figura 27: Detalle de una tuerca deslizante utilizada como sistema de fijación.

Aunque previamente se diseñó un sistema para facilitar la recolección de polvo depositado una vez terminada la prueba realizada, debido a su elevado coste y como este sistema no es necesario para el correcto funcionamiento de la cámara, se omitirá este sistema, dejándolo para futuras mejoras. Todos los componentes de este grupo fueron distribuidos por RS (31), siendo Bosch Rexroth (32) el fabricante.

4.2.1.3 GRUPO 2: DISPENSADORES.

Tal y como se explicó anteriormente, una vez se recibió la oferta, se rechazó el primer diseño de los dispensadores dado su excesivo coste, por lo que se diseñó y posteriormente se fabricó otro sistema de dispensación de polvo. Este grupo es unido a través de tornillos M6 a la estructura del grupo 1. Está formado por un ventilador comercial Sunon proporcionado por RS(31), 4 piezas construidas por conformado de chapa de aluminio de 1 mm de espesor y una bisagra comercial de 80mm, que une mediante tornillos comerciales M3 el recipiente donde se deposita el polvo y la tapa que será abatida por el ventilador (cuyas características principales se detallarán más adelante en la explicación del sistema creador de flujo turbulento), el cual es fijado a su vez al dispensador con cuatro tornillos M4. Las demás piezas irán montadas entre sí, sin ninguna sujeción. En el anexo 2 se incluyen los cálculos justificativos correspondientes a la fuerza de empuje del ventilador sobre la tapa del difusor, comprobándose que estos ventiladores son capaces de derribarla una vez activados.



Figura 28: Detalle del sistema de difusión de polvo.

En la Figura 28 se aprecian los dispensadores antes (derecha) y después (izquierda) de las pruebas, como se observa después de las pruebas realizadas con polvo de talco (explicadas en el siguiente capítulo), se añadió un sistema formado por un motor de corriente continua de 12V, un cepillo con forma de L que se fabricó con elementos sobrantes del laboratorio y un cojinete con rodamiento de bolas comercial de diámetro externo de 28mm e interno de 6,5mm. Tanto los motores como los rodamientos fueron proporcionados por RS(31).

4.2.1.4 GRUPO 3: SISTEMA ENCARGADO DE CREAR EL FLUJO TURBULENTO

La generación de la nube de polvo, se forma a partir de la creación de un régimen de fluido turbulento dentro de la cámara, utilizando para ello, ventiladores comerciales fabricados por SUNON. Estos son de motor axial y sus características principales son:

- Corriente de suministro: 1000mA
- Flujo de aire: 254.9m³/h
- Presión estática: 0,62 inch-H₂O
- Potencia: 12W

- Tensión de funcionamiento: 12Vcc
- Nivel de ruido: 54dB
- Tamaño: 120x120x38mm
- Tipo de rodamiento: Anillo de doble bola.
- Velocidad del ventilador: 4500rpm
- Temperatura de funcionamiento: -20°C a 70°C.

Se seleccionó dicho ventilador por estar dentro de los disponibles, que soportaban temperaturas de -20°C, el que presentaba mejor relación prestaciones/precio, y un mayor tamaño. Estos ventiladores serán utilizados para crear las turbulencias, mediante el funcionamiento de un arreglo de 5 ventiladores colocados en dos filas enfrentadas (en la Figura 16 y la Figura 18 se puede apreciar la distribución de los ventiladores), cerca de las paredes de la cámara. Una vez creado el régimen turbulento, se pasaría a expulsar el polvo al interior de las turbulencias, mediante los tiradores de polvo grupo 2 obteniéndose de esta manera la nube. Finalmente, será necesario colocar filtros en la entrada de aire de los ventiladores, para evitar que las partículas de polvo dañen éstos. En la Figura 29 se muestra el ensamblaje de estos ventiladores a la estructura del grupo 1.

4.2.1.5 GRUPO 4: BASE DE LOS SENSORES.

Como sucedió con el sistema de recolección de polvo y el primer diseño de los difusores, después de la recepción de la oferta por la empresa fabricante, se descartó la fabricación por mecanizado de dicha base. Como solución alternativa se aprovechó una base anteriormente fabricada en otro proyecto, para situar en ella el sensor a testear, mientras que aprovechando los cestos incluidos en el congelador, se fabricó un sistema para la sujeción de los sensores de validación. En la Figura 30 se aprecia dicha base formada por dos conjuntos.



Figura 29: Detalle sistema generador flujo turbulento

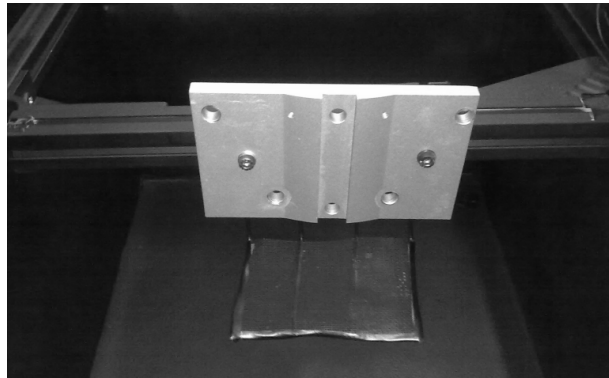


Figura 30: Detalle de la base de los sensores.

4.2.1.6 GRUPO 5: SISTEMA DE NITRÓGENO.

Se desplazará el aire del interior de la cámara con gas de nitrógeno para secar y limpiar el ambiente, algo completamente necesario para cumplir las especificaciones, para posteriormente testear el sensor para el que se construye esta cámara. La creación de una atmósfera inerte con N_2 , se comete porque la humedad podría dañar el sensor, al aumentar el riesgo de congelamiento. Para este fin, se utiliza una bombona de nitrógeno conectada a través de una manguera a la cámara y una válvula para el escape de aire. El aire del interior de la cámara será desplazado por el nitrógeno, suministrado a mayor presión, por diferencia de presiones. En la Figura 31 se muestra la bombona y válvula que se utilizarán en las pruebas.



Figura 31: Detalle de bombona (izquierda) y válvula (derecha) del sistema de nitrógeno.

4.2.2 ASPECTOS DE INSTRUMENTACIÓN.

En esta sección se detalla toda la instrumentación empleada para la realización de este proyecto. Existen tres partes diferenciadas, el circuito de potencia de alimentación de los ventiladores, el sistema de medida de temperatura y los sensores de medida de concentración de polvo en suspensión. La comunicación con el exterior, se realiza a través del conjunto formado por pasacables y conectores comerciales de 2,4 ó 6 vías, tal y como se muestra en la Figura 32.

4.2.2.1 CIRCUITO DE POTENCIA.

El circuito de potencia da soporte a los sistemas de dispersión de polvo y de generación de flujo turbulento. Para su implementación se disponen de dos fuentes de alimentación cc ISO-TECH programables de modo conmutado, (ISO-TECH IPS405 (33)), cuyas características principales son:

- Gama de corriente 0 - 5A
- Gama de tensión 0-40V
- Número de salidas 1
- Tensión de alimentación 115/230 V, 50/60 Hz $\pm 15\%$
- Tensión de entrada nominal 230 V

- Tipo de medidor: LCD
- Control de conexión/desconexión de salida
- Funcionamiento de tensión/corriente constante
- Interfaz RS-232

Atendiendo a estas características, la corriente que nos proporciona dicha fuente es un factor limitante en el diseño, puesto que esta proporciona un máximo de 5A. Considerando este factor, se barajaron dos alternativas:

- Circuito serie-paralelo (Figura 33a): Este circuito proporciona una tensión de 12V y una corriente de 1A a cada ventilador, dando una potencia de 12W, utilizando una fuente.
- Circuito serie (Figura 33b): Esta conexión proporciona una potencia de 12W a cada ventilador, pero a diferencia del anterior necesita dos fuentes.

Tras el estudio de ambas opciones, se seleccionó el circuito serie. Aunque este circuito presenta como inconveniente el uso de dos fuentes de tensión, tiene la ventaja de disponer de un circuito de potencia para cada sistema. También se desechó el circuito serie-paralelo dado la elevada potencia a disipar por la resistencia (12W), lo que produce un calentamiento de la misma. Esto a su vez, origina un foco de calor en el interior de la cámara, indeseable para cumplir las especificaciones de temperatura homogénea en el interior.

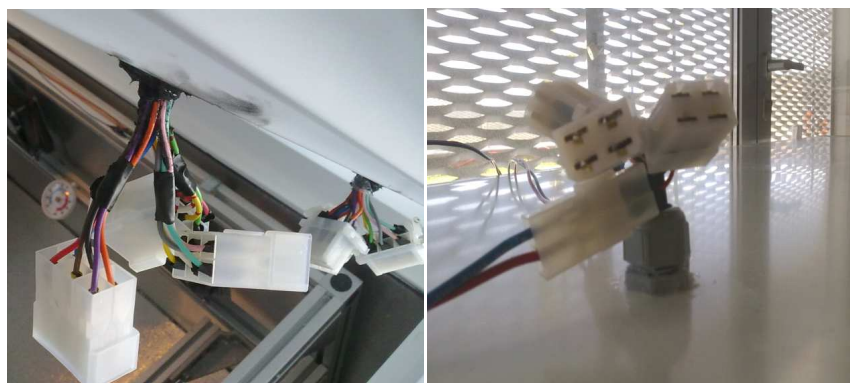


Figura 32: Detalle de los pasacables y conectores empleados.

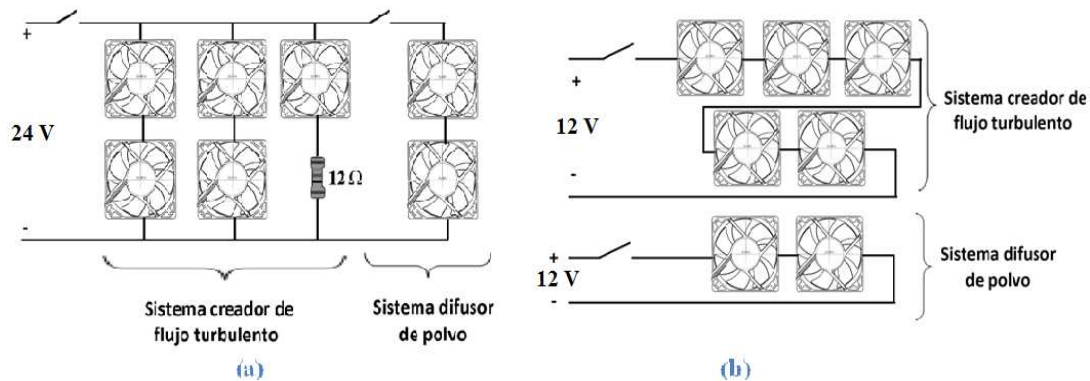


Figura 33: Conexión de ventiladores. a) configuración serie-paralelo. b) configuración serie.

Tras la primera prueba con polvos de talco se añadió un sistema barredor con dos motores de corriente continua, debido a que los dispensadores no difundían todas las partículas de polvo depositadas en su interior, con lo que no se podría calcular de manera estimada la concentración de polvo. Para su alimentación se implementó un sistema compuesto por un interruptor y una pila de 9V, conectando los dos motores en paralelo.

4.2.2.2 MEDIDA DE TEMPERATURA.

Puesto que se disponía de un registrador de datos de termopar de ocho canales, se aprovechó para la toma de medidas de temperatura en el interior. En la Figura 34 se presenta una imagen del TC-08 de Pico Technology (34), El TC-08 es un registrador de datos de temperatura basado en PC que permite recopilar, analizar y visualizar los datos de hasta 8 termopares. El registrador de datos ofrece además conectividad mediante USB. Funciona con los tipos más habituales de termopares B, E, J, K, N, R, S y T (en la Figura 35a se muestran los conectores de los termopares con el TC-008). Presenta una amplia escala de temperaturas, con resolución vertical de 20 bits, así como precisión de $\pm 0,2\%$ y $0,5^{\circ}\text{C}$. No precisa fuente de alimentación, toma la corriente del puerto USB. Los datos se pueden visualizar o exportar en formato gráfico y numérico. También se pueden establecer límites de alarma de máxima y mínima temperatura. La Tabla 1 muestra la escala y resolución de los distintos tipos de termopares. Finalmente, se posicionaron 8 termopares

tipo K (en el interior de la cámara, en distintas posiciones y alturas. Con esta distribución se consigue saber si la temperatura es o no homogénea dentro de la cámara. Para su posicionamiento se utilizaron unos pequeños tubos flexibles de plástico tal y como se aprecia en la Figura 35b.

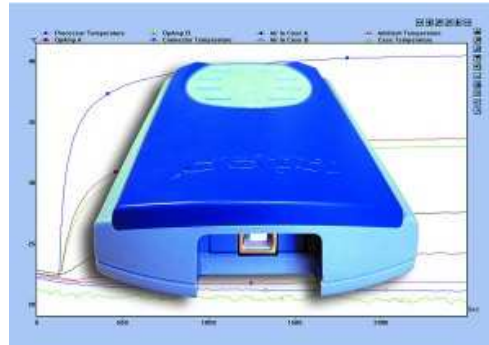


Figura 34: Registrador de datos de termopar de ocho canales TC-08.



Figura 35: Termopares tipo K. (a) Conexión externa de los termopares. (b) Detalle de uno de los termopares en interior de la cámara.

Tabla 1: Resolución y escala de los distintos tipos de termopares

Tipo de termopar	Escala total °C	0,1°C de resolución	0,025°C de resolución
B	de -20 a 1820	de -20 a 1820	de 600 a 1820
E	de -270 a +910	de -270 a +910	de -260 a +910
J	de -210 a +1200	de -210 a +1200	de -210 a +1200
K	de -270 a +1370	de -270 a +1370	de -250 a +1370
N	de -270 a +1300	de -270 a +1300	de -230 a +1300
R	de -270 a +1300	de -270 a +1300	de -20 a 1760
S	de -50 a +1760	de -50 a +1760	de -20 a 1760
T	de -270 a +400	de -270 a +400	de -250 a +400

4.2.2.3 MEDIDA DE CONCENTRACIÓN DE POLVO.

La medida de concentración de polvo, mediante los sensores comerciales, requiere de la siguiente instrumentación (en la Figura 36 encontramos una imagen de los distintos dispositivos):

- 2 multímetros Agilen 34410A, 6,5 dígitos(35): El Agilent 34410A es un multímetro digital de alto rendimiento diseñado para ofrecer precisión, alta velocidad y versatilidad. El 34410A es un multímetro de 6,5 dígitos, de display doble que ofrece 10.000 lecturas por segundo con una resolución de 5,5 dígitos y 1.000 lecturas por segundo con una resolución de 6,5 dígitos. Posee asistente para registro de datos, resistencia y frecuencia, y conectividad LAN, USB y GPIB añadidas.
- 2 sensores de polvo de la serie GP2Y1010AUOF de SHARP (36): Se eligió este dispositivo por poseer una tecnología similar a la del sensor a testear, por poseer una sensibilidad ($0,1\text{mg/m}^3$) similar al citado sensor y su precio. Otras detalles se recogen a continuación:
 - Dimensiones: 30x46x17.6mm.
 - Temperatura máxima de funcionamiento: 65 °C.
 - Temperatura mínima de funcionamiento: -10 °C.
 - Temperatura máxima de almacenamiento: 80 °C.
 - Temperatura mínima de almacenamiento: -20 °C.
 - Máximo tensión de alimentación: 5.5V c.c.
 - Mínima tensión de alimentación: 4.5V c.c.
 - Corriente de funcionamiento: 20 mA.
 - Sensibilidad: $0,1\text{mg/m}^3$.
 - Tensión de salida: 0-3,6V. En la Figura 37a se aprecia la forma de onda de la tensión, mientras que en la Figura 37b, la relación entre tensión y cantidad de polvo en suspensión.
 - Voltaje sin medida de polvo: 0- 1,5V. (típico 0,9V).

Aunque la temperatura de funcionamiento mínima, es mayor que la temperatura que debe soportar, se seleccionaron estos dispositivos debido al aumento excesivo del precio de aquellos capaces de soportar temperaturas inferiores a -20°C . Se plantea la posibilidad de incluir una pequeña resistencia, junto a dichos sensores, para su calentamiento. Tras las primeras pruebas realizadas, explicadas con más detalle en los apartados 5.3 y 5.4, se comprobó el funcionamiento correcto de estos dispositivos a una temperatura de -20°C . A tenor del funcionamiento a temperaturas de -20°C , no se incluyeron resistencias para el calentamiento de los sensores.

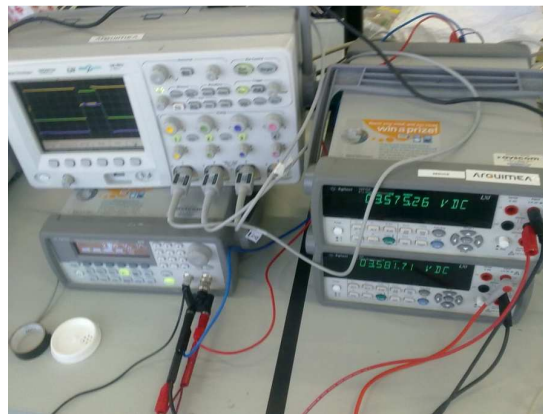


Figura 36: Instrumentación empleada en la adquisición de datos de concentración de polvo.

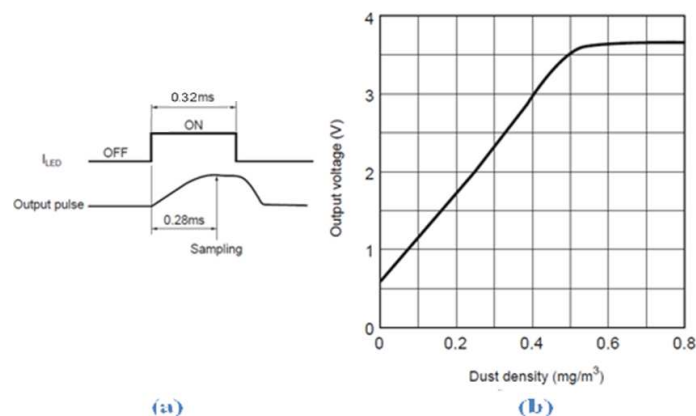


Figura 37: Tensión de salida del GP2Y1010AUOF de SHARP. a) Forma de onda de la tensión de salida del sensor y de la corriente de entrada del led. b) Relación entre tensión de salida densidad de polvo en suspensión.

- 1 generador de funciones serie 33220A 20 MHz de Agilent(37):
Proporciona síntesis digital directa de las formas senoidal y cuadrada de rampa, triángulo, generación de ruido e impulsos con borde variable y con formas de onda de c.c. La modulación AM, FM y PWM, el barrido lineal y logarítmico y la descarga son estándar. Características del dispositivo:
 - Interfaces USB, GPIB y LAN.
 - Modo gráfico para la verificación visual de la configuración de señal.
 - Resolución de 14 bits.
 - Profundidad de memoria de 64K y velocidad de muestreo de 50 MSa/s.
- 1 fuente de alimentación cc programables serie E3649A de Agilent (38):
Las fuentes de alimentación cc Agilent son programables a través de su interfaz y controladas mediante el software "Plug and Play" incluido. Las especificaciones más relevantes son:
 - Gama de corriente: 1,4 A / 0,8^a.
 - Gama de tensión: 35 V / 60V.
 - Número de salidas: 2.
 - Tensión de alimentación: 100 - 115 - 230Vca.
 - Salidas simples y dobles.
 - Potencia de salida de 30 a 100 W.
 - Protección contra sobretensión.
 - Terminales de salida frontales y traseros.

Atendiendo a las características del sensor de polvo de validación y la instrumentación disponible, las entradas y salidas de la Figura 38a corresponden a:

1. V-LED: tensión de alimentación del led infrarrojo (5V).
2. LED-GND: tierra del led.

3. LED: con esta entrada controlamos la corriente aportada al infrarrojo. De la Figura 37a se saca la conclusión, de que en cada toma de muestras (siendo el periodo mínimo de 10 ms, es decir una muestra cada 10 ms), la corriente por el led ha de estar actuando unos 0,32ms. Para conseguirlo se utilizó el generador de funciones. Como se quieren tomar una muestra por segundo se introduce una onda de tensión de 5V con un pulso bajo de 0,32ms y un periodo $T=1s$ (Figura 38b).
4. S-GND: tierra.
5. Vo: tensión de salida de los sensores (0-3,6V).
6. Vcc: tensión de alimentación de los sensores (5V).

La toma de resultados se llevó a cabo con dos multímetros Agilen 34410A, explicado con anterioridad. En la Figura 37a se observa que el valor de tensión a medir, se obtiene 0,28ms después del flanco de subida de la corriente del led. Por otro lado, el multímetro no captura datos instantáneos, sino que muestra el valor medio de un intervalo de integración definido. La apertura mínima de integración de este dispositivo, es de $100\mu s$ con un error del 0,11% (35), por lo que se adquirirán los resultados pasados 0,20 ms, de la activación del infrarrojo. Para lograrlo se conecta la salida del generador de funciones al multímetro, esperando los 0,20 ms a partir del flanco de bajada de la onda aportada por dicho generador. Para reducir el ruido se empleó en la medida de lo posible, cables apantallados y el filtro interno del multímetro.

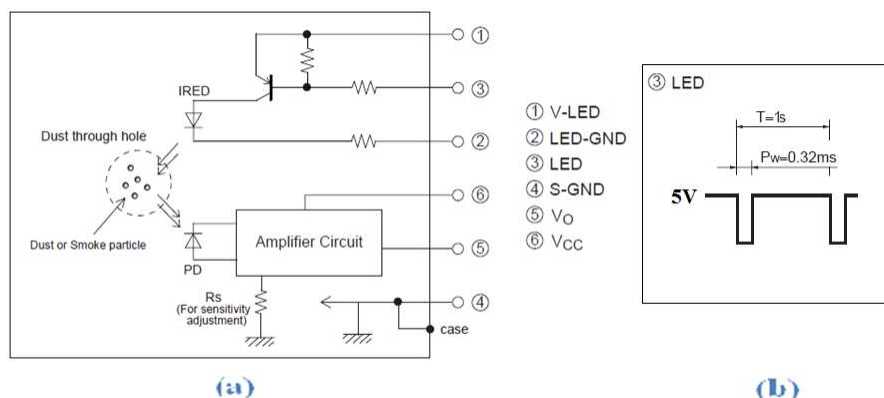


Figura 38: a) Entradas y salidas del sensor de polvo. b) Forma de onda de la entrada "LED".

Se facilitó la toma de muestras, mediante un programa hecho en labview. Este programa se comunica con los multímetros, por medio del puerto serie, configurándolos y almacenando los resultados. Este programa dispone de una interface gráfica, donde se seleccionan los puertos de los multímetros. Una vez presionado el botón de “start”, los datos obtenidos se pueden ir observando en tiempo real por medio de una gráfica. En la Figura 39 vemos esta interface. No se incluye el código de dicho programa, ya que este se desarrolló a partir de un programa perteneciente a una empresa del vivero de la universidad Carlos III de Madrid.

Opcionalmente se utilizó un osciloscopio para comprobar que la forma de onda obtenida coincidía con la esperada. En la Figura 40 se presentan dos medidas realizadas con el osciloscopio. En la primera de ellas se observa la saturación del sensor, dando este su máximo de tensión (3,6V), con lo que la concentración de polvo en suspensión será mayor de $0,6 \text{ mg/m}^3$. En cambio en la Figura 40b, se puede apreciar perfectamente la forma de la onda de tensión, siendo esta la esperada, por lo que estaríamos en disposición de conocer la concentración en ese instante de tiempo.



Figura 39: Interface gráfica del programa capturador de datos.

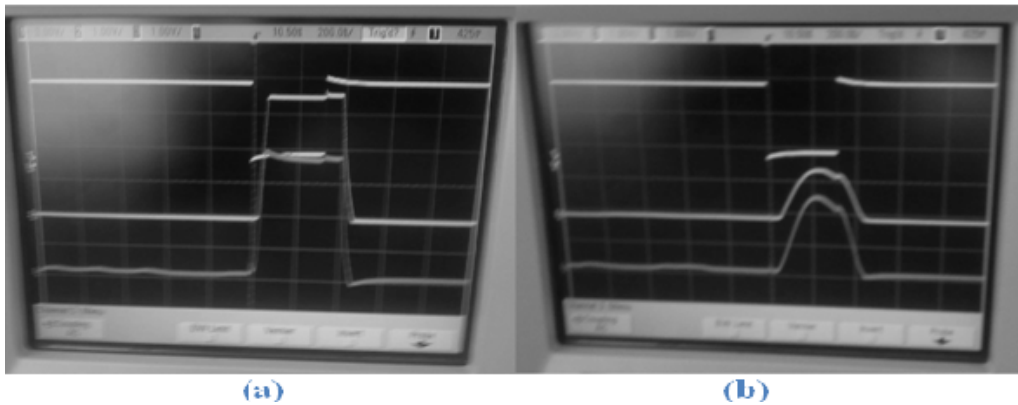


Figura 40: Detalle de las graficas obtenidas con el osciloscopio: a) Sensores saturados. b) Sensores no saturados

Capítulo 5.

5 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.

Una vez construida la cámara se realizaron una serie de pruebas para la comprobación del funcionamiento de la misma. Como se explicó anteriormente siguiendo la metodología empleada tras la detección de algún fallo, se procede al rediseño y posteriormente se procederá a otra prueba, realizándose este ciclo tantas veces como fuesen necesarias para la correcta validación de la cámara.

5.1 PUESTA A PUNTO.

En esta prueba se comprobó la hermeticidad de la cámara, comprobando las posibles fugas de gas. Para realizarla se acopló una bomba de aire al extremo de entrada de nitrógeno y se obturó el de escape, con ayuda de agua jabonosa se detectaron las fugas existentes, dado que al aplicar dicha sustancia sobre las superficies susceptibles de fugas y al introducir aire a presión dentro de la cámara, se observarían burbujas en las zonas en las que existían fugas. En la Figura 41 podemos visualizar el sistema utilizado para la detección de fugas.

Tras la realización de estas primeras pruebas se observaron dos puntos conflictivos:

- Pasacables (Figura 42b): Para su solución se procedió a sellar los pasacables con silicona tanto exterior como interiormente. Tras el sellado se comprobó la desaparición de dichas fugas
- Tapa del congelador (Figura 42a): En las pruebas en las se debe utilizar nitrógeno, se recubrirá con film transparente y se unirá con cinta americana, la tapa del congelador con el mismo. Esta solución nos servirá a su vez para comprobar que el nitrógeno está desplazando el oxígeno.

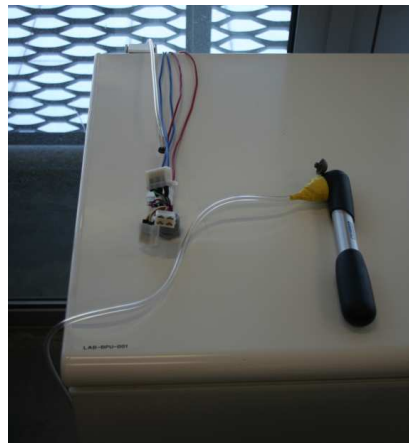


Figura 41: Detalle del sistema de detección de fugas



Figura 42: Detección de escapes. a) Fuga en la tapa. b) Fuga de los pasacables

5.2 TEST DE TEMPERATURA.

Para comprobar el funcionamiento del sistema de refrigeración se situaron 8 termopares en el interior de la cámara a distintas alturas y posiciones. El gráfico de la Figura 43 muestra la relación de la temperatura con respecto al tiempo. Observando la gráfica comprobamos que se alcanza una temperatura inferior a los -20°C , pero no es totalmente homogénea en el interior de la cámara, si no que esta aumenta según nos acercamos a la tapa y nos alejamos del fondo, situación razonable dado que el sistema de refrigeración está distribuido por el fondo y las cuatro paredes. Existiendo una diferencia máxima de 2°C . Como se testeo en anteriores pruebas, se descubrieron fugas en la junta de la tapa, con lo que existe una mayor transferencia de calor con el exterior en dichas zonas, confirmando el decremento de temperatura de la parte superior a la inferior de la cámara. Dado que las diferencias no son elevadas se da por cumplido el requisito de temperatura. El pico de temperatura existente pasados los 4000s, es debido a la apertura de la cámara, que se realizó como comprobación visual del funcionamiento de los ventiladores, dado que se estaba trabajando a una temperatura inferior a su mínima de funcionamiento, resultando esta positiva.

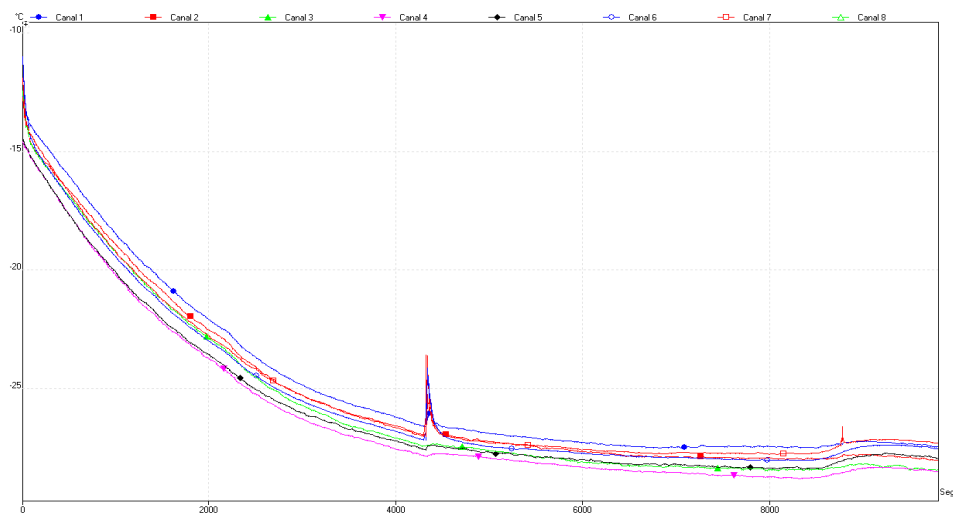


Figura 43: Test temperatura

5.3 PRUEBA 1.

Después de solucionar los problemas de hermeticidad, se procedió a la realización de las pruebas con polvos de talco¹, se eligió este tipo de polvo por su bajo coste, tamaño, por ser un silicato al igual que el polvo de corindón con el que se calibrará el sensor (polvo con tamaño de grano homogéneo de 4,5µm) y por poseer una densidad mayor que dicho corindón ($\rho_{\text{talco}}=2,7\text{g/cm}^3$ y $\rho_{\text{corindón}(4,5\mu\text{m})}=1,8\text{g/cm}^3$), con lo que aseguramos el funcionamiento de la cámara con el polvo con el que se calibrará el sensor. Tras la realización de la prueba, como se puede observar en la siguiente figura, se consiguió cumplir el requisito de distribución homogénea del polvo en la cámara. Sin embargo, se detectaron dos problemas relacionados con los difusores de polvo, por un lado estos no difundían todas las partículas de polvo depositadas en su interior, con lo que no se podría calcular de manera estimada la concentración de polvo en el interior de la cámara dado que esta está relacionada con el peso y el volumen siguiendo la ecuación [5.1]. Siendo χ la concentración, m la cantidad de polvo en el aire y V el volumen de la cámara.

Por otro lado se observó que tras un periodo prolongado de funcionamiento, los filtros se obstruyen, disminuyendo consigo el flujo de aire de los ventiladores, con lo que llegado un cierto momento, los ventiladores no disponen de fuerza suficiente para vencer la resistencia puesta por la tapa, ya que disminuye el flujo de aire aportado por el ventilador, con lo que se reduce la fuerza ejercida sobre la tapa. Las mediciones de la concentración del polvo se recogen en la Figura 45.

$$\chi = \frac{m}{V} \quad [5.1]$$

¹ Los pasos seguidos en esta prueba, al igual que en la siguiente se pueden consultar en las instrucciones de uso creado para dicha cámara (Anexo 1)



Figura 44: Distribución del polvo tras la realización de la prueba

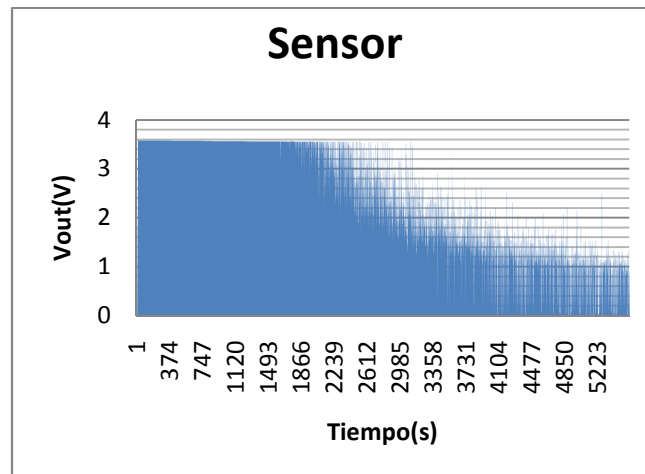


Figura 45: Resultados prueba 1.

Como era de esperar tras el apagado de los ventiladores y por tanto la entrada en reposo de la cámara, la tensión de salida de los sensores de polvo disminuyó con el tiempo. Esta lo hace de una forma exponencial, tal y como se aprecia en la Figura 45 . Por otro lado, la concentración de polvo también disminuirá debida a la relación de esta con el voltaje de salida mostrada en la Figura 37b, pudiéndose medir concentraciones entre $0-0,6\text{mg/m}^3$ ($0-3,6\text{V}$) con una resolución de $0,1\text{mg/m}^3$. La diferencia significativa entre dos muestras consecutivas, es debida principalmente, al método empleado en la toma de resultados y en menor medida al ruido existente (se intento reducir con el filtro interno que posee el multímetro y la utilización de cables apantallados para la conexión de los sensores). En la realización de este proyecto no se solucionará, dado que con los resultados obtenidos se consigue la validación de la cámara, dejando esta mejora como futuros desarrollos.

5.4 PRUEBA 2.

Tras solucionar los problemas detectados, mediante un cepillo accionado con un motor de corriente continua (anteriormente se explicó con más detalle en el capítulo 4), se consiguió conocer la concentración de polvo en suspensión en el instante inicial. Además tras un hipotético atascamiento de los filtros, en los que no se desplazasen las tapas de los difusores, el cepillo está situado de tal manera que en su movimiento circular presiona sobre la tapa del difusor, produciendo su abertura. En la Figura 46 se contempla el sistema difusor de polvo con la mejora implementada.

Como sucedió en la prueba anterior, el polvo se distribuyó de manera homogénea por toda la superficie interior de la cámara. En la Figura 47 se presentan los datos recogidos por los sensores de polvo comercial(36), a diferencia de la anterior prueba se dispusieron de dos sensores repartidos por la cámara. Al igual que en el caso anterior la concentración de polvo en suspensión disminuye con el tiempo de manera exponencial (ya que la tensión de salida está relacionada con la cantidad de polvo según la gráfica de la Figura 37b), sumado a la ausencia de nuevos inconvenientes tras la finalización de esta prueba y previa aplicación de pintura en todas las superficies interiores de la cámara, se entra en disposición de la calibración del sensor para el que se diseñó la cámara.



Figura 46: Detalle del difusor con cepillo tras la realización de la prueba.

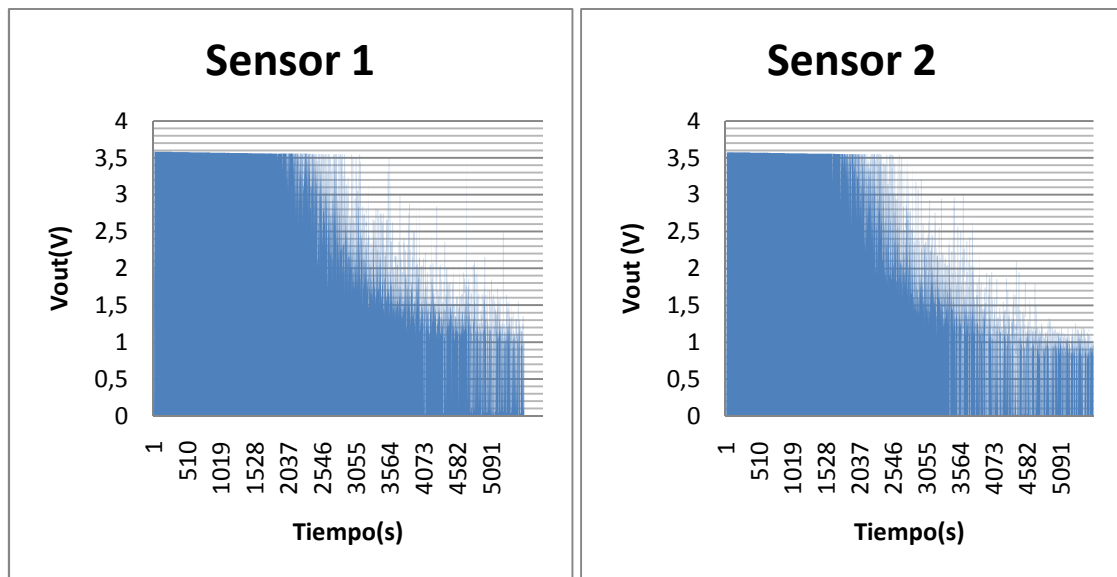


Figura 47: Resultados prueba 2. Izquierda datos del primer sensor y derecha los del segundo sensor

Capítulo 6.

6 PRESUPUESTO.

Este proyecto consistió en el diseño, construcción y validación de una cámara de polvo, para ello se siguió la planificación presentada por el diagrama de Gantt de la Figura 48. Como se observa no se podía empezar una tarea hasta la finalización de la siguiente, salvo en las etapas de prueba y rediseño que se realizaron conjuntamente. El periodo de ejecución de las tareas es estimativo, dado que no llegaron a emplearse 8 horas diarias, con lo que el proyecto se realizó en un periodo de tiempo mayor.

En el presupuesto que se presenta más adelante, se contemplan de un modo estimado, los costes de realización del Proyecto, incluyendo los costes relativos al material empleado, los equipos y el personal. No se incluyen las facturas por motivos de confidencialidad, dado que estas pertenecen a una empresa privada del parque tecnológico de Leganés, la cual subvencionó este proyecto.

6.1 COSTE DEL MATERIAL.

Los costes asociados al material utilizado para el desarrollo del proyecto se resumen en la Tabla 2, se incluye todo el material empleado para la construcción de la cámara, así como el coste derivado de la subcontrata de la fabricación de ciertos componentes. Se desprecia el coste del cableado y se supone totalmente amortizada las herramientas. Los costes relacionados con los equipos se detallan en la Tabla 3. Todos los precios de la Tabla 2 y Tabla 3 incluyen IVA.

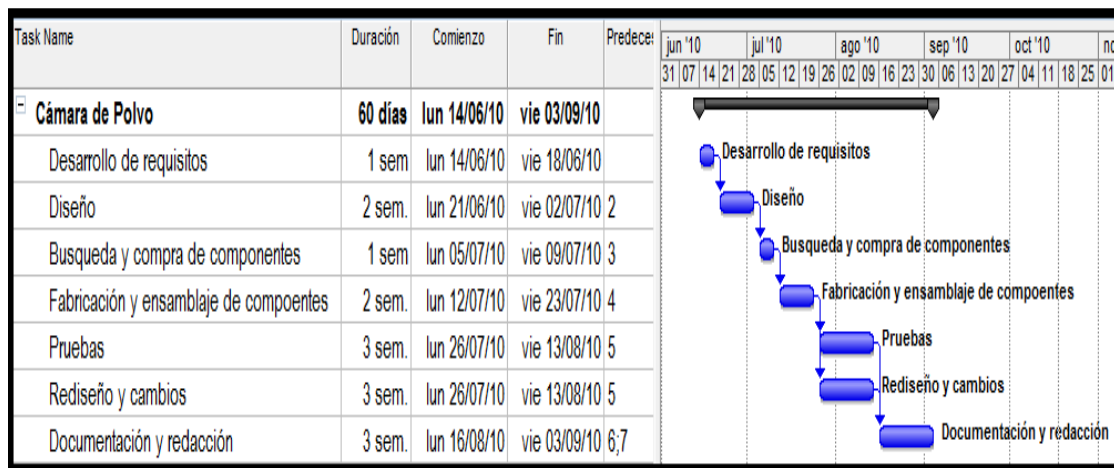


Figura 48: Diagrama de Gantt

Tabla 2: Coste del material.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	COSTE UNIDAD (€)	TOTAL (€)
ZANUSSI ZFC 50 JF arcón-congelador	1	464,6	464,6
Bombona nitrógeno	1	165	165
Válvula nitrógeno	1	277,77	277,77
Manguera nitrógeno	1	43,07	43,07
Perfil de Aluminio 30x30x3m	4	38,17	152,68
Cubo conector perfiles 30x30	4	10,84	43,36
Escuadras 30x60x60	18	6,64	119,52

Bloque deslizante M6 (Bolsa 10 unidades)	7	15,37	107,59
Pies ajustables perfiles 30x30	4	4,61	18,44
Dispensadores	2	33,3	66,6
Sujeción ventiladores	10	0,75	7,5
Ventilador axial Sunon 12Vdc	7	19,8	138,6
Pintura acrílica RAL9011 400ml	6	6,98	41,88
Portafiltros + filtros	7	9,45	66,15
Pasacables	4	1,986	7,944
Silicona	2	5,6	11,2
Sensor GP2Y1010AUOF de SHARP	2	13,71	27,42
Conector S6B-ZR-SM4A-TF	2	0,43	0,86
Termopares tipo k	8	7,35 €	58,8
Polvos de talco	1	0,8	0,8
Conector 6vías	14	3,1	43,4
Conector 4vías	4	2,4	9,6
Conector 2 vías	4	1,5	6
Cinta aislante	2	2,12	4,24
Cinta americana	1	7,68	7,68
Film transparente	1	0,89	0,89
Rodamiento de bolas liso	2	4,555	9,11
Motor	2	5,25	10,5
COSTE TOTAL DEL MATERIAL			1911,204

Tabla 3: Coste equipos.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	COSTE UNIDAD (€)	% USO	DEDICACIÓN (MESES)	PERIODO DE DEPRECIACIÓN	TOTAL (€)
TC-08 Pico Technology	1	366,06	25	1	60	1,53
Agilent 34410A	2	1.041,00	$\frac{18,75}{2}$ $(\frac{25+12,5}{2})$	1	60	6,51

Agilent E3649A	1	991,00	25	1	60	4,13
Agilent 33220A	1	1.494,00	25	1	60	6,23
ISO-TECH IPS405	2	399,99	25	1	60	3,33
COSTE TOTAL EQUIPOS						21,72

Para el cálculo del coste de amortización de los equipos se siguió la ecuación [6.1], donde A es el número de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado, B es el periodo de depreciación (60 meses), C el coste del equipo y D el % del uso que se dedica al proyecto.

$$Coste(equipo) = \frac{A}{B} * C * D \quad [5.1]$$

La suma de ambos coste alcanza un total de 1932,924€, inferior al presupuesto inicial.

6.2 COSTE DEL PERSONAL.

Para el cálculo de los costes de personal, se estima un único ingeniero industrial con salario bruto anual de 30.000 €.

Las cargas sobre el salario son:

Seguridad Social.....	27%
Desempleo y F.P	1.7%
TOTAL	28.7%

Para un total de 1800 horas de trabajo al año, este salario supone un coste por hora de trabajo de 25 €/hora.

Analizando la duración del Proyecto y el tiempo invertido por el personal, se obtiene la Tabla 4. La Tabla 5 refleja el coste total en mano de obra

considerando una jornada laboral de 8h/día y cinco días laborables a la semana.

Tabla 4: Duración del proyecto y personal empleado.

CONCEPTO	TIEMPO	PERSONAL IMPLICADO
DESARROLLO DE LOS REQUISITOS	1 SEMANA	INGENIERO INDUSTRIAL
DISEÑO	2 SEMANAS	INGENIERO INDUSTRIAL
BUSQUEDA Y COMPRA DE COMPONENTES	1 SEMANA	INGENIERO INDUSTRIAL
CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE	2 SEMANAS	INGENIERO INDUSTRIAL
PRUEBAS	1,5 SEMANAS	INGENIERO INDUSTRIAL
REDISEÑO Y CAMBIOS	1,5 SEMANAS	INGENIERO INDUSTRIAL
DOCUMENTACIÓN Y REDACCIÓN	3 SEMANAS	INGENIERO INDUSTRIAL

Tabla 5: Coste total en mano de obra.

CONCEPTO	HORAS	COSTE/HORA (€/hora)	COSTE TOTAL (€)
DESARROLLO DE LOS REQUISITOS	40	25	1000
DISEÑO	80	25	2000
BUSQUEDA Y COMPRA DE COMPONENTES	40	25	1000
CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE	80	25	2000
PRUEBAS	60	25	1500
REDISEÑO Y CAMBIOS	60	25	1500
DOCUMENTACIÓN Y REDACCIÓN	120	25	3000
COSTE TOTAL DE LA MANO DE OBRA			12000

6.3 COSTE TOTAL.

Resumiendo, el coste total del diseño y desarrollo del presente proyecto fin de carrera se estima alrededor de los 14000€, tal y como se puede contemplar en la Tabla 6.

Tabla 6: Coste total del proyecto.

CONCEPTO	COSTE TOTAL
COSTE TOTAL DE MATERIAL	1911,204
COSTE DE EQUIPOS	21,72
COSTE TOTAL DE MANO DE OBRA	12000
COSTE TOTAL	13932,924

Capítulo 7.

7 CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto se ha intentado explicar los procesos de diseño, construcción y validación de una cámara de polvo. Se han detallado y estudiado los factores más importantes para cumplir los requisitos establecidos. Para ello se han realizado las pruebas necesarias, solucionando los problemas encontrados, llegando incluso al rediseño del sistema. Gracias a la metodología que se ha ido desarrollando a lo largo del proyecto, se ha sido capaz de localizar los futuros inconvenientes que aparecerían durante la calibración del sensor, procediendo inmediatamente a la solución del mismo. Consiguiéndose cumplir los principales requisitos pedidos, ajustándose al presupuesto inicial: temperatura homogénea de -20°C , estructura opaca mayor de 1m, atmósfera inerte, etc. Se demostró que el sistema, que en principio se suponía aislado y hermético, en realidad no lo era, resultando más deficiente conforme aumentaba la presión interior. Afortunadamente se solucionó, sellando las zonas conflictivas. Por otro lado el sistema de adquisición de datos, empleado

para los sensores de polvo comerciales es poco preciso, ya que no tomamos el valor de la tensión pasados 0,28 ms del flanco de subida de la corriente, sino que el dato tomado proviene del periodo de integración de 0,2 a 0,3 ms tras la activación del led.

Con todo ello se puede decir que la cámara de polvo está dispuesta para comenzar la calibración del sensor de polvo perteneciente al proyecto MEIGA-METNET. Cabe comentar que las pruebas de calibración, aunque todavía no se han realizado (por causas ajenas a este proyecto), no se incluirían dada la confidencialidad de estas.

7.1 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.

Algunos de los futuros desarrollos que se pueden llevar para la mejora de la cámara de la que trata este documento son los siguientes:

- Sistema de recolección de polvo: construir o rediseñar el sistema que no se construyó debido a su coste. Si este no fuese en el futuro un factor limitante, convendría incluir un cajón en la parte inferior de la bandeja para una vez terminadas las pruebas sea posible limpiar la cámara barriendo el polvo hacia el cajón, tapar y extraer el cajón cómodamente.
- Sistema de polarización de polvo: como se comentó anteriormente el cargar electrostáticamente el polvo no es necesario, pero podría ser conveniente para aproximarse a las condiciones de Marte lo máximo posible. Esto se podría realizar diseñando una malla situada en el sistema de difusión de polvo, a la que se uniría un generador externo de alto voltaje (de 1 a 10 kV), consiguiéndose una carga positiva de las partículas que atravesasen dicha malla.
- Sistema de calentamiento: con ello se pretende tener un mayor control de temperatura.

- Sistema de presión: para asemejarse aún más a las condiciones atmosféricas de Marte, se podrían incorporar una bomba para aumentar la presión y sensores de presión para controlar su correcto funcionamiento.
- Sistema de alimentación: sustituir las fuentes de corriente, por un transformador comercial de 12V y como mínimo de 7 A. Se podría aprovechar este transformador para alimentar a su vez los motores del sistema barredor, con la implementación previa de un regulador.
- Sensores comerciales: convendría mejorar el sistema de adquisición de datos o sustituir los sensores. Para la mejora del sistema de toma de medidas, se propone la adquisición de un nuevo multímetro o un driver que nos permita reducir el periodo de integración, así como el diseño de un filtro externo, para reducir aún más el ruido.
- Sistema de control: Implementar un sistema de control computarizado que se encargue tanto de activar y desactivar los distintos sistemas, así como de la adquisición de datos.
- Añadir una pequeña ventana con cristal de zafiro para medir la concentración de polvo externamente. Esta idea no se abordó en un principio por el precio del cristal y la dificultad de su adquisición e implementación.

Estas mejoras se llegarían a desarrollar en función de las necesidades de los futuros sensores a calibrar, y sobre todo del coste de la ejecución de las distintas mejoras. Siendo recomendables la primera de ellas, el sistema de recolección de polvo y la última (ventana de cristal de zafiro), para la calibración de este primer sensor. El sistema de recolección, aunque no influye en la calibración del sensor, mejora la puesta en funcionamiento de la cámara, ya que disminuye el tiempo de preparación de una nueva prueba al facilitar la



limpieza. En cambio la ventana de cristal de zafiro proporcionaría un sistema de calibración adicional, para corroborar los resultados de los sensores presentes en el interior.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1]. CCI. "Equipos para ensayos de estanqueidad a la lluvia y al polvo". http://www.cci-calidad.com/Pdf/camaras_estanqueidad.pdf. (2010).
- [2]. CCI. "Camaras de ensayo". <http://www.cci-calidad.com/>. (2010).
- [3]. ASTER. "Equipos de laboratorio para la simulación". http://www.asterwash.it/main_spa/camaras-de-prueba.html (2010).
- [4]. Envirotronics. "Sand and Dust Chambers". <http://www.envirotronics.com/dust.html>. (2010).
- [5]. WEISS THECNIK. "The whole world of environmental simulation". <http://www.wut.com/en/wut/start>. (2010).
- [6]. Testing europe. "IEC test equipment ". <http://www.iectestequipment.eu>. (2010).
- [7]. NAE. "DUNES - Dust Test Chambers ". <http://www.naenvirosystems.com/detalle.php?tipo=productos&numero=7>. (2010).
- [8]. CM Envirosystems. "Aerial-Dust test chambers ". http://www.cmenvirosystems.com/html/product_aerial.html. (2010).
- [9]. Martín Gago, Jesús Manuel Sobrado y José Ángel. "La tecnología de vacío en la simulación espacial". 2010.
- [10]. Marslab. "The Mars Simulation Laboratory". <http://marslab.dk/>. (2010).
- [11]. ESA. "IWF Chamber". <http://www.spaceflight.esa.int/users/index.cfm>. (2010)
- [12]. Buchanan, R. K., A. Barnett. "Capabilities of the Mars Electrostatics Chamber at Kennedy Space ". 2000.
- [13]. NASA "DeepChamber_Goddard". http://gsfctechnology.gsfc.nasa.gov/TechSheets/DeepChamber_Goddard.pdf. (2010).
- [14]. Astrobiology Magazine. " Mars Contamination Dust-Up". <http://www.astrobio.net/exclusive/3495/mars-contamination-dust-up>. (2010).
- [15]. NASA. " NASA Simulates Small Martian 'Dust Devils' and Wind in Vacuum Tower". <http://www.nasa.gov/centers/ames/research/exploringtheuniverse/vaccumchamber.html>. (2005).
- [16]. Universidad de Amsterdam. "Mars Simulation Chamber" http://www.science.uva.nl/sites/astrobio/reviews/MarsChamber_June26.pdf. (2010).

- [17]. Néstor Nava Rodríguez. "Memorias de Diseño de una Cámara de Polvo Marciano". Departamento de Ingeniería de sistemas y automática (2008).
- [18]. Luis Moreno. "Estudio de un dust wiper como mecanismo de eliminación de polvo marciano depositado sobre el sensor UV del instrumento MSL-REMS". Departamento de Ingeniería de sistemas y automática (2006).
- [19]. Instituto Meteorológico de Finlandia. "Definition of science objectives". <http://metnet.fmi.fi/index.php?id=71> . (2010).
- [20.] Instituto Meteorológico de Finlandia. "EDLS Concep". <http://metnet.fmi.fi/index.php?id=49>. (2010).
- [21]. A.M. Harri, W. Schmidt, K. Pichkhadze, V. Linkin, L. Vazquez, M. Uspensky, J. Polkko, M. Genzer, A. Lipatov, H. Guerrero, S. Alexashkin, H. Haukka, H. Savijarvi, J. Kauhanen . "Mars MetNet Precursor Mission" (PDF). Congreso Europeo. <http://cosis.net/abstracts/EPSC2008/00361/EPSC2008-A-00361-1.pdf>. (2008)
- [22]. Instituto Meteorológico de Finlandia. "MetNet Mars Precursor Mission. <http://metnet.fmi.fi/index.php?id=93>. (2010).
- [23] Tribuna Complutense. "El hombre del tiempo amplía sus predicciones hasta el planeta Marte". <http://www.sim.ucm.es/cont/descargas/prensa/tribuna1721.pdf> (2008).
- [24].David Usero. "La mision MEIGA-MetNet: La exploración de Marte". http://www.educa.madrid.org/web/ies.valmayor.valdemorillo/p.inicio/Charla_MARTE.pdf (2010).
- [25]. Meiga-Metnet. "Datos sobre Marte". <http://meiga-metnet.org/>.(2010).
- [26]. NASA. "NASA, Mars: Facts & Figures". <http://solarsystem.jpl.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Mars&Display=Facts>(2010).
- [27]. GA Landis, K. Herkenhoff, R. Greeley, S.Thompson,P. Whelley. " Dust and Sand deposition on the MER solar arrays as viewed by the microscopic imager". Ciencia lunar y planetaria XXXVII, vol 1932.(2006)
- [28]. MB Madsen, HM Arneson, P. Bertelsen, JF Bell III, CS Binau, R. Gellert, W. Goetz, HP Gunnlaugsson,KE Herk-enhoff, SF Hviid, JR Johnson, MJ Johnson, KM Kinch, G. Klingelhöfer, JM Knudsen, K. Leer, DE Madsen, E. McCartney, J. Merrison, DW Ming, RV Morris. " An update on results from the magnetic properties experiments on the Mars exploration rovers, Spirit and Opportunity". Ciencia lunar y planetaria XXXVI (2005).



- [29]. Luis Moreno, Ramiro Cabas y Diego Fernandez. "Low mass dust wiper technology for MSL rover"(2006).
- [30]. Instituto Meteorológico de Finlandia." DS - Dust Sensor".
<http://metnet.fmi.fi/index.php?id=118>. (2010).
- [31]. Distribuidora RS. <http://es.rs-online.com/web/>.(2010).
- [32]. Bosch Rexroth. <http://www.boschrexroth.es>. (2010).
- [33]. ISO-TECH. "Data Sheet ISO-TECH IPS405". <http://es.rs-online.com/web/search/searchBrowseAction.html?method=getProduct&R=4461847>. (2010).
- [34]. Pico Technology. "User's Manual USB TC-08". <http://docs-europe.origin-electrocomponents.com/webdocs/050c/0900766b8050ca42.pdf>. (2010).
- [35]. Agilent. "User's Manual Agilent 34410A". <http://docs-europe.origin-electrocomponents.com/webdocs/0b40/0900766b80b40129.pdf>. (2010).
- [36]. SHARP, "Data Sheet SHARP GP2Y1010AUOF". <http://docs-europe.origin-electrocomponents.com/webdocs/0e15/0900766b80e1519f.pdf>. (2010).
- [37]. Agilent. "User's Manual Agilent 33220A. <http://docs-europe.origin-electrocomponents.com/webdocs/0ceb/0900766b80ceb842.pdf>. (2010).
- [38]. Agilent. "Data Sheet Agilent E3649A".<http://docs-europe.origin-electrocomponents.com/webdocs/0d0e/0900766b80d0e995.pdf>. (2010).



ANEXOS.

ANEXO 1.

A.1. INSTRUCCIONES DE USO.

Para el correcto funcionamiento de la cámara de polvo es necesario considerar diversas pautas que contemplan tanto el sellado de la cámara como la alimentación de los distintos componentes. Dichas pautas son descritas a continuación de manera detallada:

1. Lo primero de todo es colocar y conectar toda la instrumentación empleada dentro y fuera de la cámara.
2. Tras la colocación de la instrumentación requerida en el interior de la cámara, se procederá a la deposición del polvo en el interior de los difusores; seguidamente se cerrarán las tapas de los difusores y la de la cámara en sí.
3. La siguiente pauta, sólo es aplicable en las pruebas que requieren atmósfera inerte, por lo que se procederá en primera instancia al

sellado de la cámara con film transparente y cinta americana (unión entre la tapa y el resto de la estructura). Una vez sellado, se conecta la bombona de nitrógeno. No continuaremos con el paso siguiente hasta que se haya desplazado todo el aire del interior, remplazándose éste por N_2 .

4. Una vez cerrada la cámara y desplazo el aire, si la prueba lo demanda, se está en disposición de realizar la toma de medidas. Para ello se conectará primero el sistema generador de flujo turbulento, transcurrido un pequeño instante de tiempo, se conectará el sistema difusor, compuesto por 2 ventiladores y un motor con cepillo. Esta última activación dispersará el polvo en el interior de la cámara.
5. A continuación se procederá a la desconexión de los sistemas de generación de flujo y el de difusión del polvo. Con ello, el polvo del interior de la cámara se irá depositando paulatinamente en el fondo de esta.
6. Por último, tras la finalización de las pruebas, sólo quedaría abrir la tapa, sacar la estructura interna y proceder con la limpieza tanto del interior de la cámara como de los ventiladores.

ANEXO 2.

A.2. CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS.

A.2.1. CÁLCULO ESTRUCTURAL

Este documento describe el cálculo estimativo de la estructura que dará sustento a la cámara de polvo a diseñar. La estructura está resuelta mediante un modelo de barras con nudos rígidos (estructura reticulada). Incluye los siguientes cálculos:

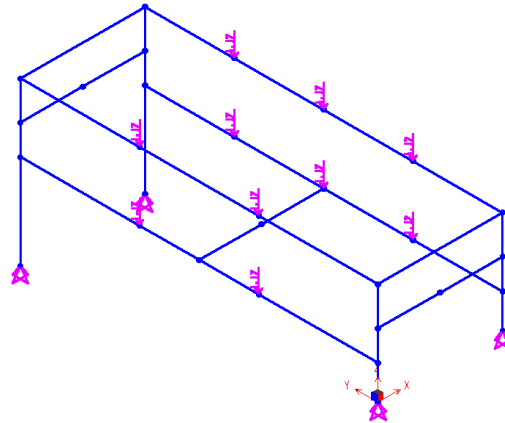
- Análisis elástico utilizando la teoría de primer orden
- Todas las verificaciones de los elementos bajo combinaciones en el E.L.

Cargas:

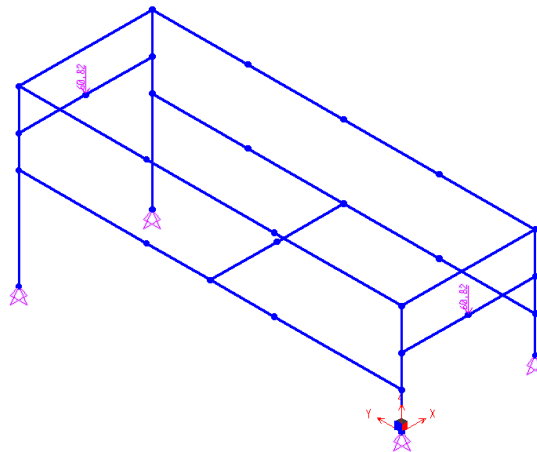
Para el estudio de cargas se suponen aquellas que debería soportar el primer diseño, dado que este es el más restrictivo, quedando la estructura sobredimensionada. Se obra de esta manera por si en un futuro se desea implementar el diseño original. Las cargas a soportar por la estructura son:

- Peso Sistema generador flujo turbulento $W_1=0,24$ [Kg]
- Peso Sistema difusor $W_2=6,20$ [Kg]
- Peso Bandeja $W_3=22,00$ [Kg]
- Peso Base del sensor $W_4=1,90$ [Kg]

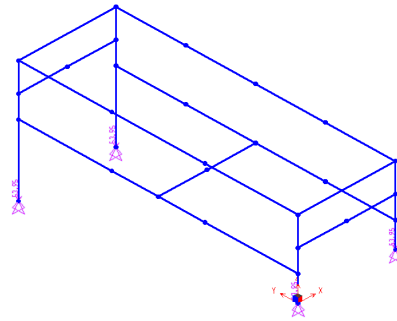
En la Figura A2.1 se muestra la distribución de los pesos.



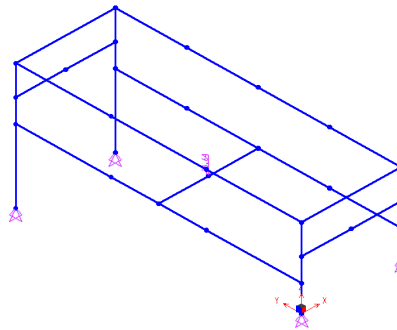
a) Peso Sistema generador flujo turbulento [W_1]



b) Peso Sistema difusor [W_2]



c) Peso Bandeja [W_3]



d) Peso Base del sensor [W_4]

Figura A2.1. Cargas a soportar

Coefficientes de seguridad parciales

- $\gamma_Q = 1,1$ (mayoración de cargas)
- $\gamma_M = 1,25$ (Coeficiente de minoración para las propiedades del material)

Sección

En la figura A2.2 se muestra el perfil empleado, mientras que en la tabla A2.1, las propiedades del mismo

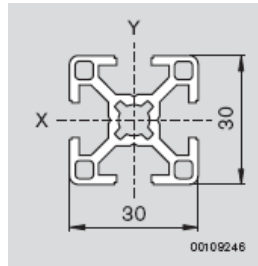


Figura A2.2. Perfil tipo

Tabla A2.1 Propiedades de la sección resistente

Sección [mm ²]	Masa [g/mm]	Limite elástico [MPa]	Momento de inercia [mm ⁴]		Modulo resistente mm ³	
A	ρ	σ_y	I_z	I_y	W_z	W_y
310	0,8	200	27000	27000	1800	1800

A.2.1.1. ANÁLISIS GLOBAL

Se asume que:

- Todas las uniones son reticuladas
- Las columnas están empotradas en su base

La estructura ha sido modelizada utilizando el programa **SAP2000 Versión 10**

Estados límite de servicio:

Las flechas verticales obtenidas mediante el modelo se recogen en la tabla A2.2. La asignación de los nudos se observa en la figura A2.3:

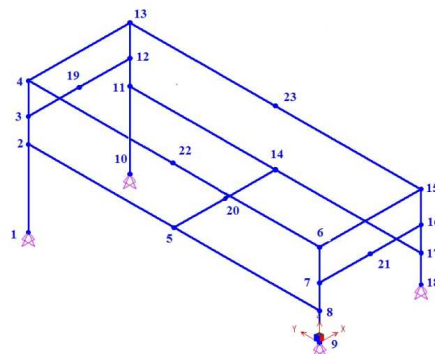


Figura A2.3. Asignación de los nudos

Tabla A2.2 Flecha vertical relativa de la pluma

Hipótesis	Nodo	u1	u2	u3	d (mm)
S101²	1	0	0	0	0,00
S101	2	-6,37E-03	0,01106	-8,01E-04	0,01
S101	3				0,00
S101	4	5,29E-05	0,01606	-1,03E-03	0,02
S101	5	-7,27E-05	0,0109	-1,21E-01	0,12
S101	6	2,65E-04	0,01658	-5,07E-04	0,02
S101	7				0,00
S101	8				0,00
S101	9	0	0	0	0,00
S101	10	0	0	0	0,00
S101	11				0,00
S101	12				0,00
S101	13	-4,41E-04	0,01638	-0,00106	0,02
S101	14	-6,90E-05	0,01122	-0,12737	0,13
S101	15	-1,51E-04	0,01696	-5,26E-04	0,02
S101	16				0,00
S101	17				0,00
S101	18	0	0	0	0,00
S101	19	-1,89E-04	0,01136	-0,0345	0,04
S101	20	-7,09E-05	0,01124	-0,15257	0,15
S101	21	4,38E-05	0,01649	-0,03241	0,04
S101	22	1,30E-04	0,01641	-0,01095	0,02
S101	23	-3,20E-04	0,01667	-0,01954	0,03

² Hipótesis S101: Estado limite de servicio (deformación) $S_G = 1$

Diagrama de esfuerzos axiales [N] (Figura A2.4).

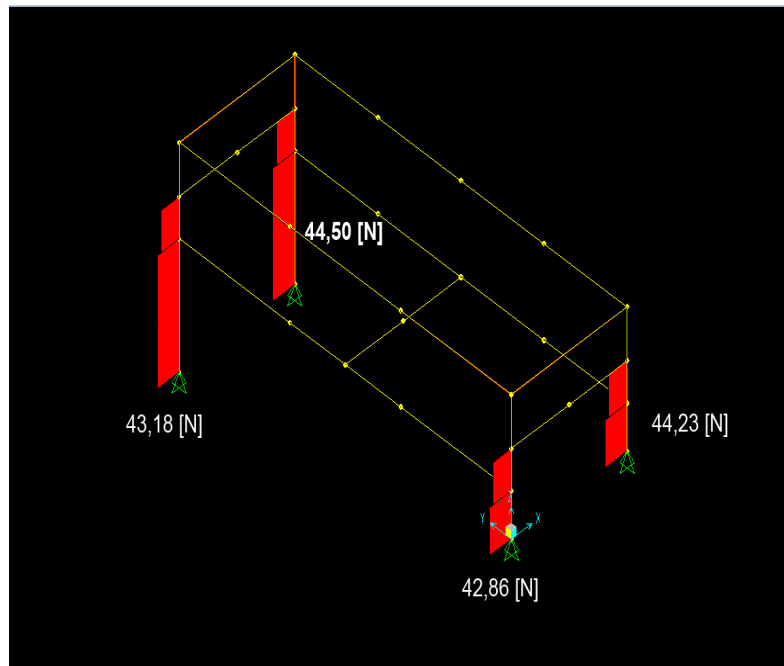
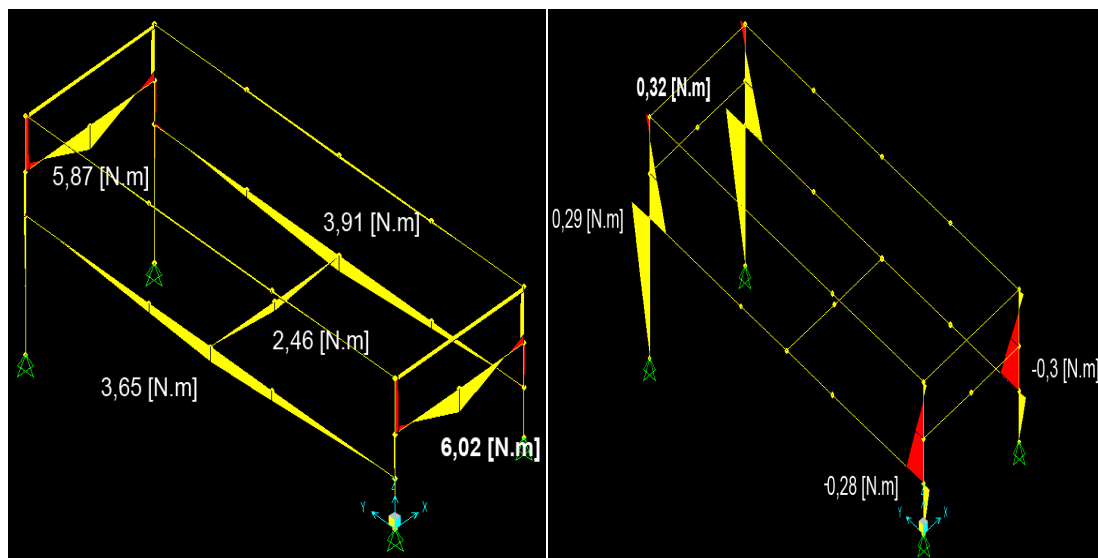


Figura A2.4. Diagrama de esfuerzos axiales

Diagrama de Momentos flectores [Nmm] (Figura A2.5).

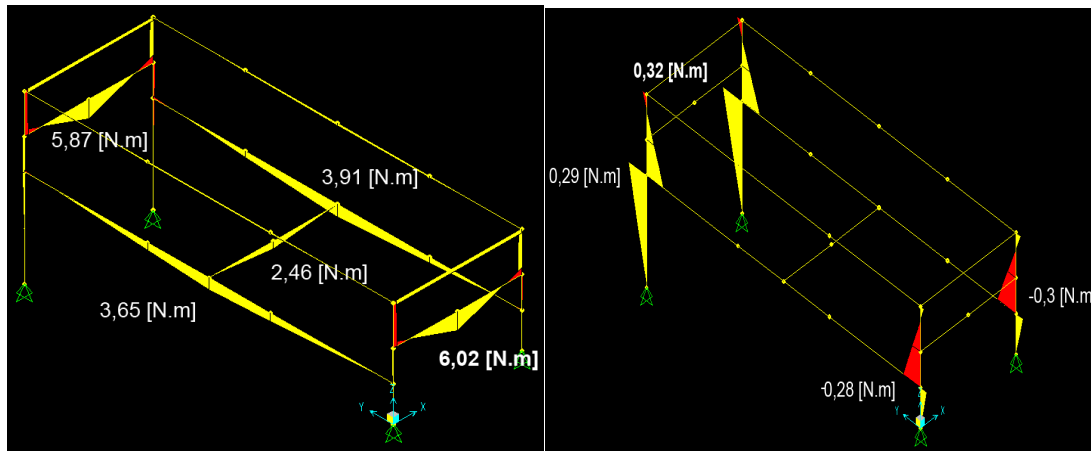


a) dirección z-z

b) dirección y-y

Figura A2.5. Diagrama de momentos flectores en la Placa Base

Diagrama de cortantes [Nmm] (Figura A2.6).



a) dirección z-z

b) dirección y-y

Figura A2.6. Diagrama de momentos flectores en la Placa Base

A.2.1.2. VERIFICACIÓN

Para la verificación se tendrá únicamente en cuenta la barra más restrictiva en cada caso.

a) Resistencia de la sección transversal

Por tratarse de una estructura reticulada, despreciamos el efecto de los axiles y cortantes frente a los momentos flectores, es decir, suponemos que las barras de la estructura ni se acortan ni se alargan. Con lo que nos centramos en la barra con el momento más restrictivo, siendo este de 6,02[Nm].

Deben cumplirse las siguientes condiciones:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{adm} \quad [A2.1]$$

Si se desarrolla la expresión A2.1 se obtiene:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq \frac{\sigma_y}{\gamma_Q} \quad [A2.2]$$

$$\gamma_Q \cdot \sqrt{\left(\frac{N}{A} + \frac{M_f}{W}\right)^2 + 3\left(\frac{V}{A_c}\right)^2} \leq \sigma_y \quad [\text{A2.3}]$$

Al despreciarse el efecto de axiles y cortantes frente a los momentos flectores:

$$\gamma_Q \cdot \sqrt{\left(\frac{M_f}{W}\right)^2} \leq \sigma_y \quad [\text{A2.4}]$$

Asignando valores:

$$1,25 \cdot \sqrt{\left(\frac{6020}{1800}\right)^2} \leq \sigma_y$$
$$4,18 \text{ MPa} \leq \sigma_y$$

Como el valor resultante es $< \sigma_y \rightarrow$ **Cumple**

b) Deformaciones

En este apartado se debe comprobar

$$\delta_{\max} \leq \delta_{adm} \quad [\text{A2.5}]$$

Para los desplazamientos verticales se debe verificar:

$$\delta_{\max} \leq \delta_{adm} \leq \frac{L}{300} \quad [\text{A2.6}]$$

La barra más restrictiva, en que existe desplazamiento vertical es la del nodo 20, por ser la segunda barra más pequeña con el mayor desplazamiento, con lo que se realizaran los cálculos para esta flecha.

$$\delta_{\max} \leq \frac{460}{300}$$

$$\delta_{\max} \leq 1,53 \quad (mm)$$

Como $\delta_{\max} = 0,15 \leq 1,53 \rightarrow$ **Cumple**

A.2.2. CÁLCULO DE LA FUERZA DEL AIRE.

En este apartado se realizarán unos sencillos cálculos justificativos, para la elección del ventilador, en el sistema difusor. Las características del ventilador elegido son las siguientes:

- Flujo de aire $254.9\text{m}^3/\text{h} = 0,07\text{m}^3/\text{s}$
- Presión estática : $0,62\text{ inch-H}_2\text{O}$
- Potencia 12W
- Tamaño $120\times 120\times 38\text{mm}$ ($S=0,0113\text{m}^2$)
- Velocidad del ventilador 4500rpm

La fuerza ejercida por los ventiladores es igual a la presión total que estos proporcionan multiplicada por el área de actuación. Siendo la presión total la suma de la presión estática y dinámica. La presión dinámica (P_d), es la fuerza por unidad de superficie provocada por el movimiento del aire y se manifiesta en el mismo sentido que la dirección de éste. Dicha presión es siempre positiva. Mientras que la presión estática (P_e) Es el valor de la fuerza que ejerce el aire sobre las paredes de las tuberías, en sentido perpendicular a ellas. Luego necesitamos calcular la presión dinámica. Sabiendo que:

$$F = P \cdot S \quad [\text{A2.7}]$$

$$P = k \cdot \rho \cdot V^2 \quad [\text{A2.8}]$$

$$V = Q/S \quad [\text{A2.9}]$$

Si suponemos que $S=A$ y con las ecuaciones A2.7, A2.8 y A2.9, para $k=0,5$ llegamos a:

$$F = 0,5 \cdot \rho \cdot \frac{Q^2}{S} \quad [\text{A2.10}]$$

Conociendo que la densidad del aire es $1,2 \text{ kg/m}^3$ y la del nitrógeno $1,2506 \text{ kg/m}^3$, tomamos $\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$. Despejando los demás valores en la ecuación A2.10, se obtiene:

$$F = 0,5 \cdot 1,2 \cdot \frac{0,07^2}{0,011} \approx 0,27N$$

Atendiendo a la figura A3.7, para que el ventilador sea capaz de derribar la tapa $F_{\text{sen}70} > W \cos 70$, con lo que este debe ejercer una fuerza superior a la del peso dividido entre la tangente de 70. Si el peso de la tapa es menor de 30g:

$$F > \frac{0,03}{\text{tg}70} \approx 0,01N$$

Como $F=0,27N > 0,01N \rightarrow$ **Cumple**

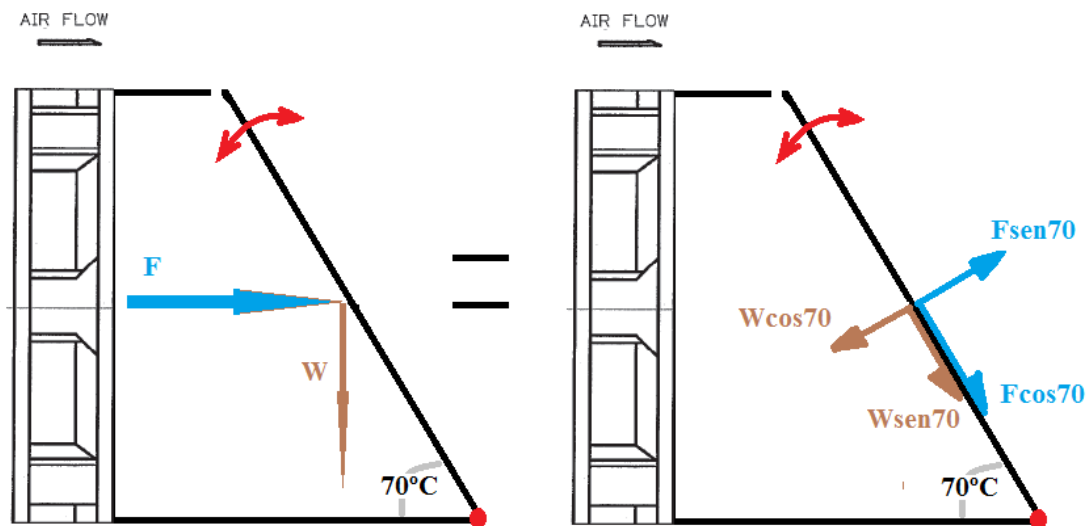
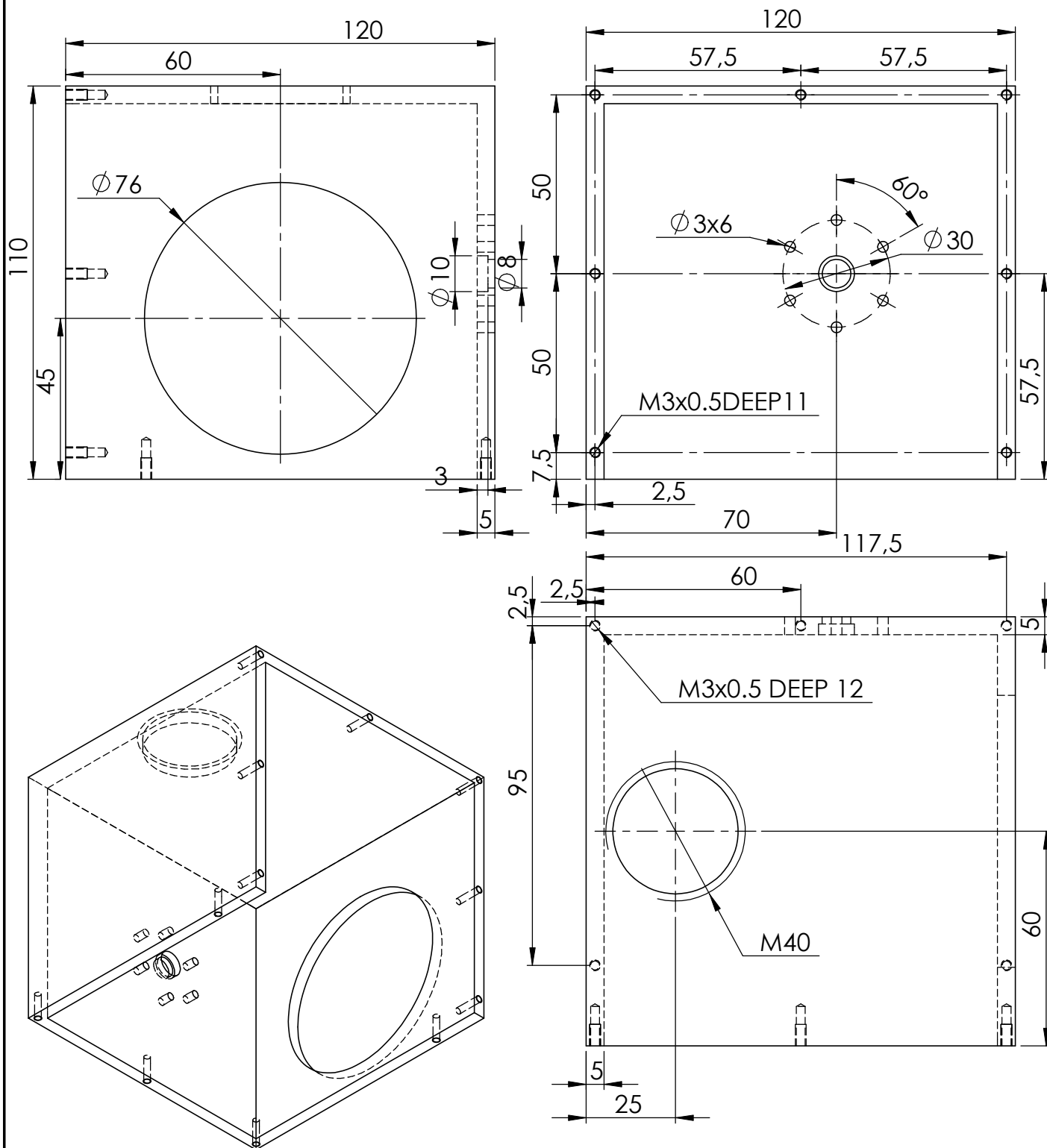


Figura A2.7. Fuerzas ejercidas en el interior del difusor.



ANEXO 1.

A.3. PLANOS.



MATERIAL: Acero

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M

DIBUJADO	Alberto Amarilla
FECHA	01/07/2010

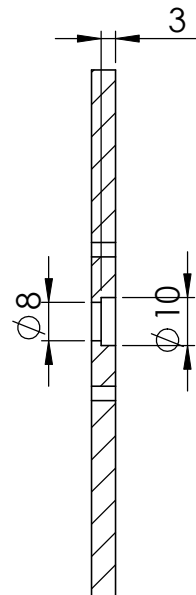
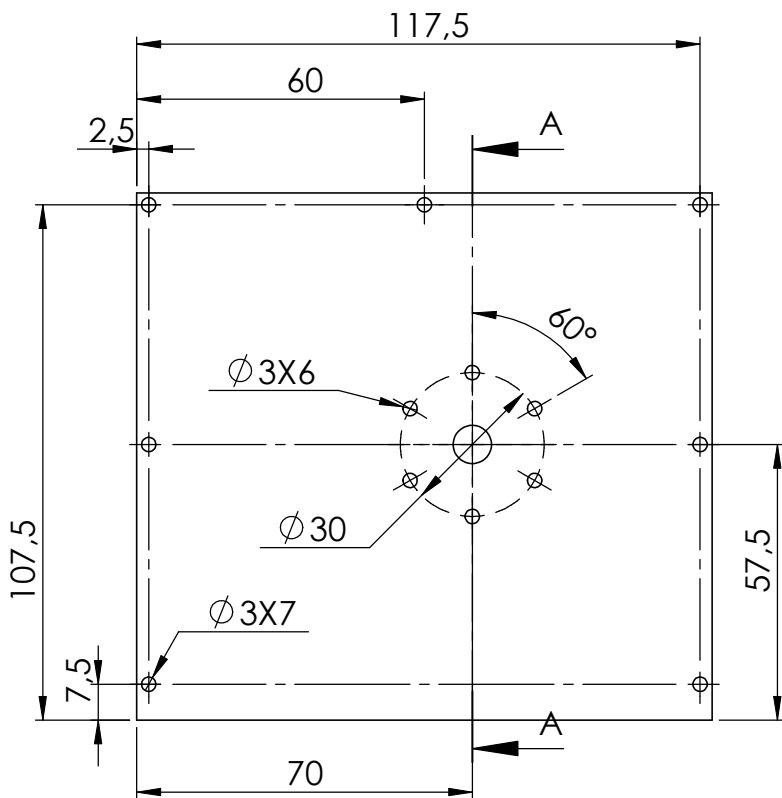
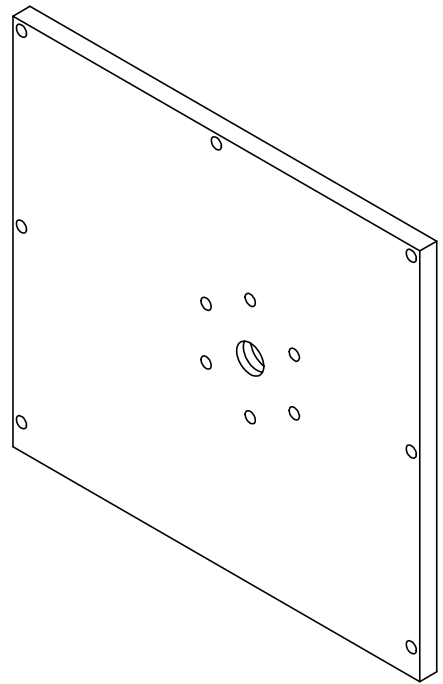
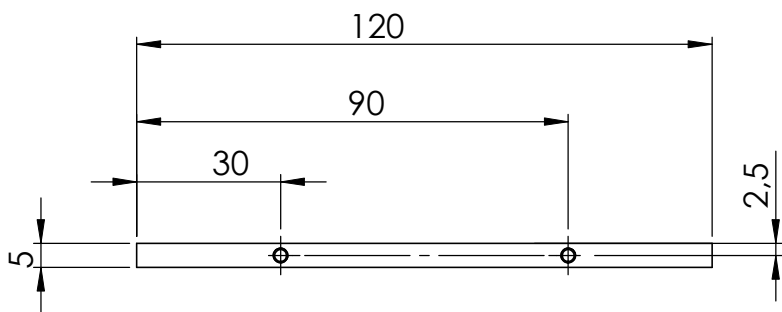
CLIENTE:

ESCALAS
-
1:1.5
-

FASE	1
------	---

NUMERO	
--------	--

CODIGO C.A.D.	MODIFICACIONES			



SECCIÓN A-A

MATERIAL: Acero

UNIDADES: 2

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M



DIBUJADO: Alberto Amarilla
FECHA: 01/07/2010

REVISADO: Nestor Nava
FECHA: 02/07/2010

CLIENTE:

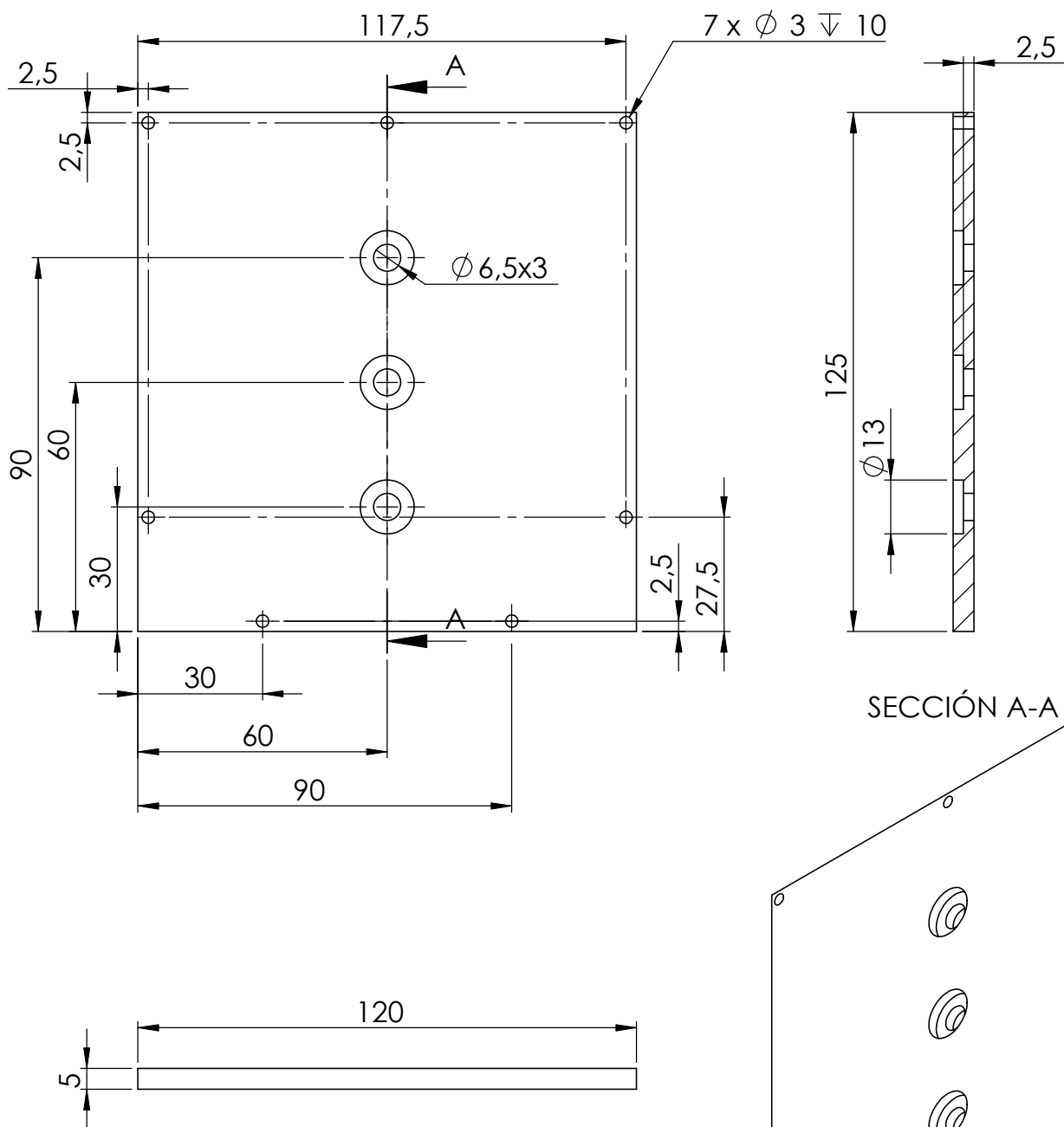
ESCALAS
-
1:1.5
-

Sistema difusor(I)
Tapa de caja polvo

FASE: **1**


NUMERO: -

CODIGO C.A.D. MODIFICACIONES

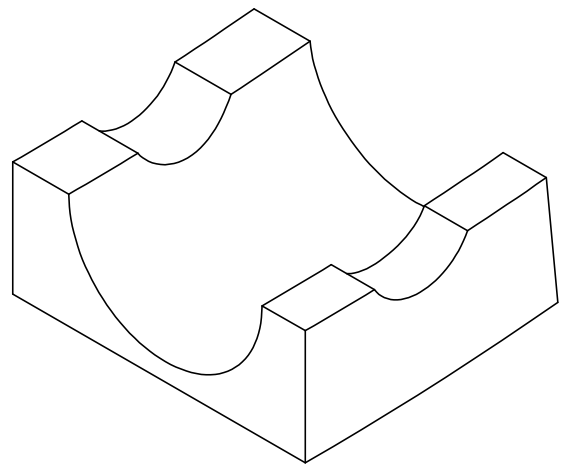
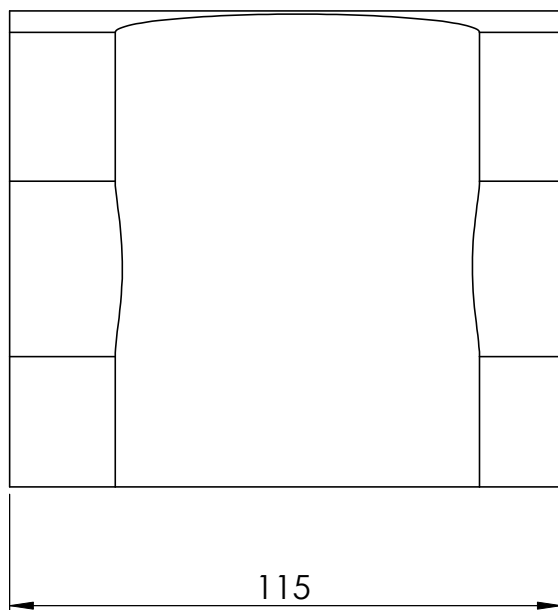
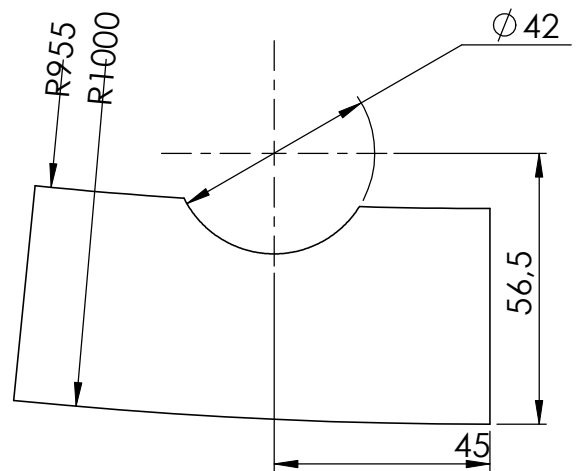
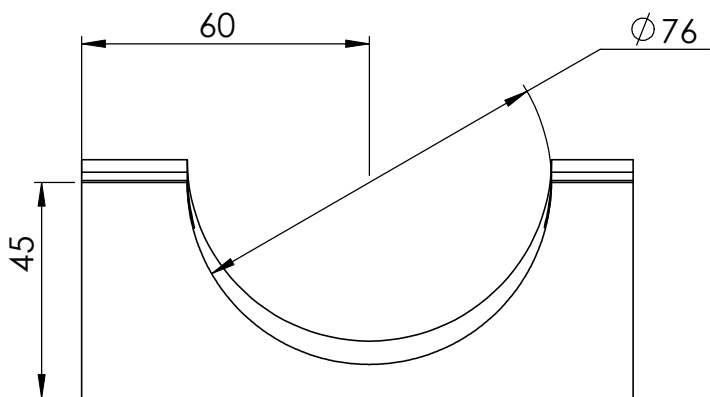


MATERIAL: Acero **UNIDADES: 2**

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M		DIBUJADO	Alberto Amarilla	REVISADO	Nestor Nava
		FECHA	01/07/2010	FECHA	02/07/2010
CLIENTE:					

ESCALAS	Sistema difusor (I)	FASE	1
1:1.5	Base caja de polvo	NUMERO	-
		CODIGO C.A.D.	MODIFICACIONES



MATERIAL: Acero

UNIDADES: 2

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M



DIBUJADO Alberto Amarilla
FECHA 01/07/2010

REVISADO Nestor Nava
FECHA 02/07/2010

CLIENTE:

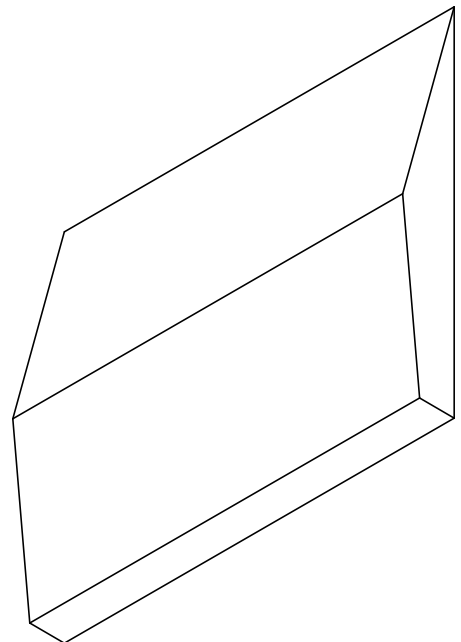
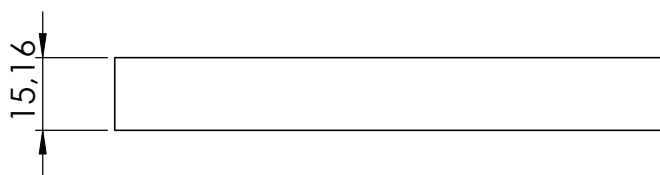
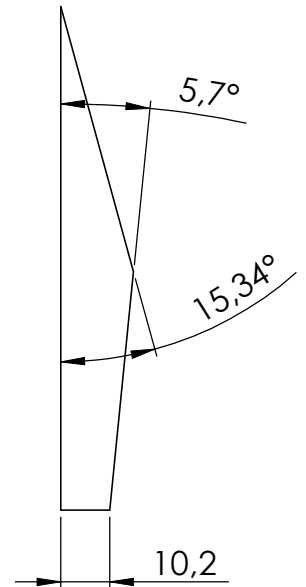
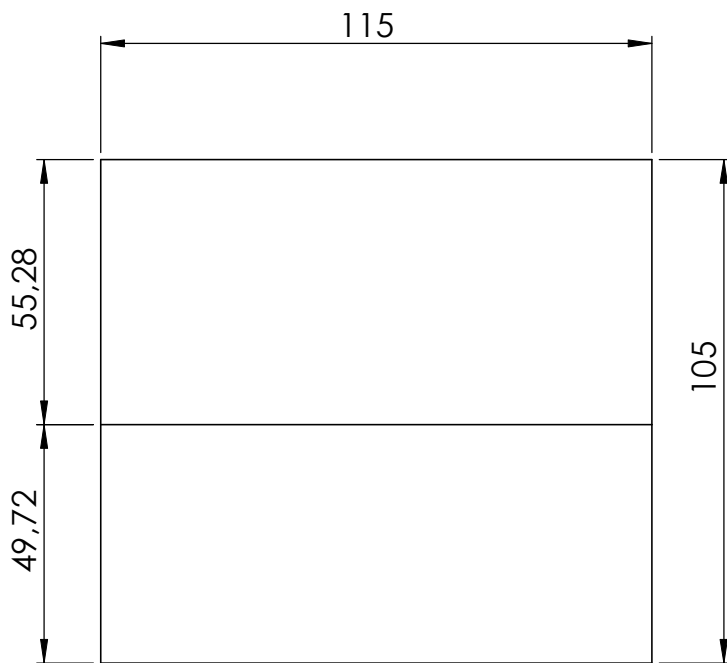
ESCALAS
-
1:1.5
-

Sistema difusor (I)
Rampa horizontal

FASE **1**

NUMERO -

CODIGO C.A.D. MODIFICACIONES



MATERIAL: Acero

UNIDADES: 2

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M



DIBUJADO Alberto Amarilla
FECHA 01/07/2010

REVISADO Nestor Nava
FECHA 02/07/2010

CLIENTE:

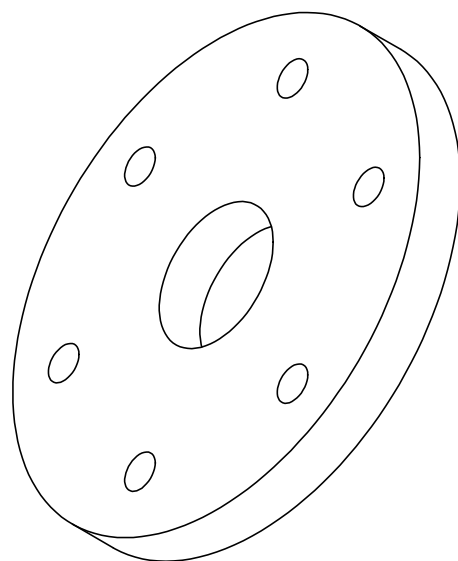
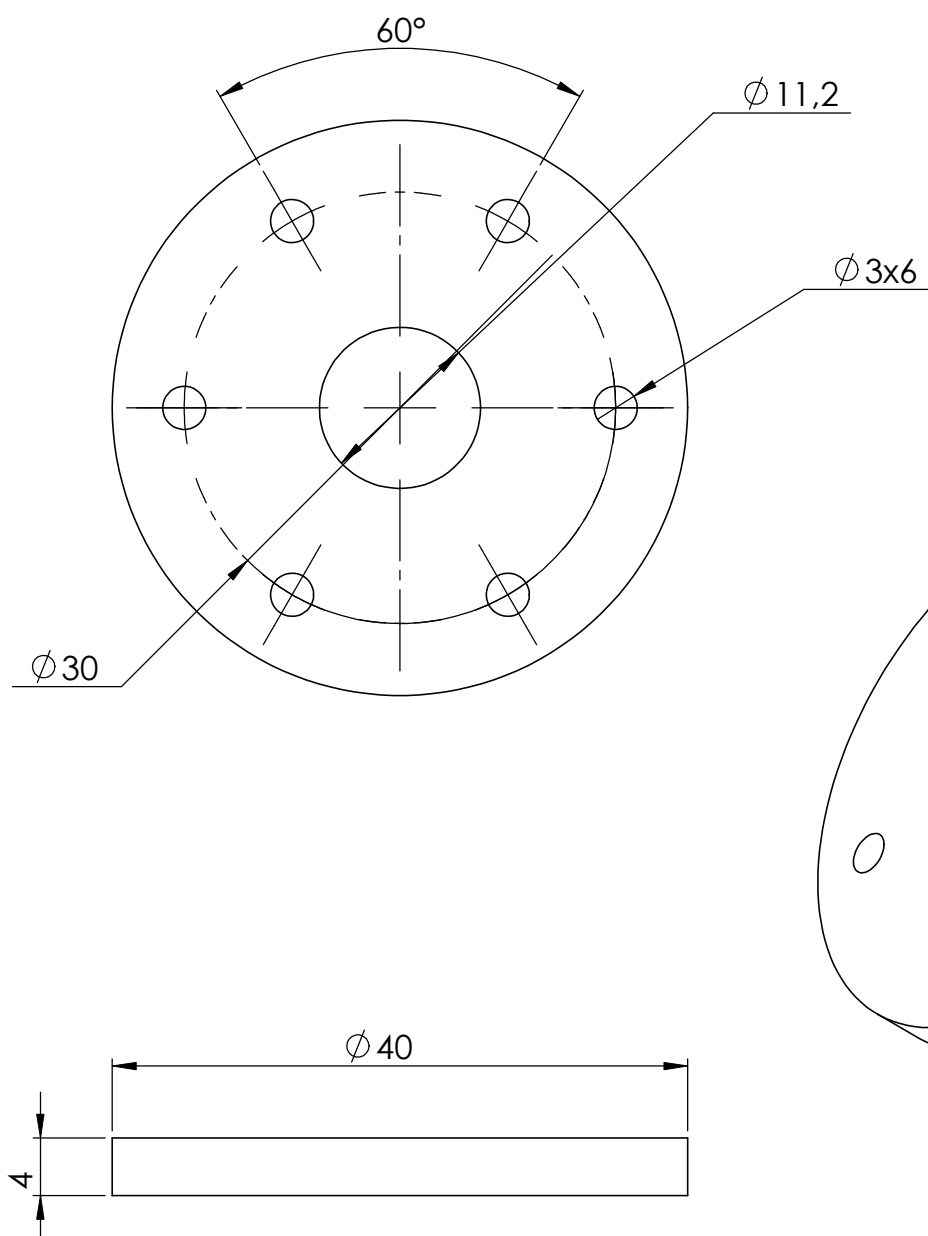
ESCALAS
-
1:1.5
-

Sistema difusor (I)
Rampa vertical

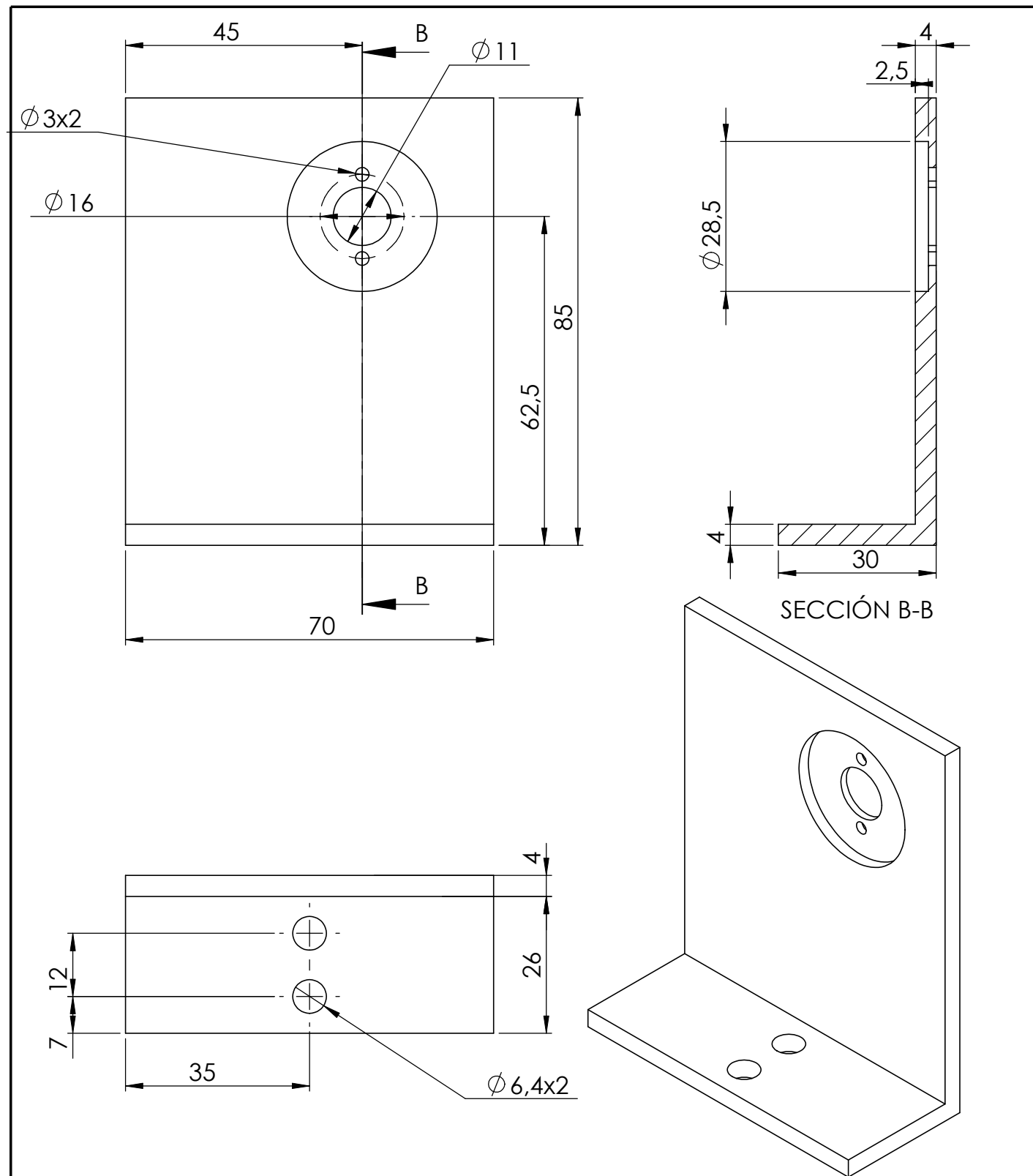
FASE **1**

NUMERO -

CODIGO C.A.D. MODIFICACIONES



MATERIAL: Acero		UNIDADES: 4	
REVISION	FECHA	MODIFICACION	
UC3M		DIBUJADO FECHA	Alberto Amarilla 01/07/2010
		REVISADO FECHA	Nestor Nava 02/07/2010
CLIENTE:			
ESCALAS - 2:1 -	Sistema difusor (I) Anillo para cojinete		FASE 1
		NUMERO -	
		CODIGO C.A.D.	MODIFICACIONES



MATERIAL: Acero

UNIDADES: 2

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M



DIBUJADO Alberto Amarilla
FECHA 01/07/2010

REVISADO Nestor Nava
FECHA 02/07/2010

CLIENTE:

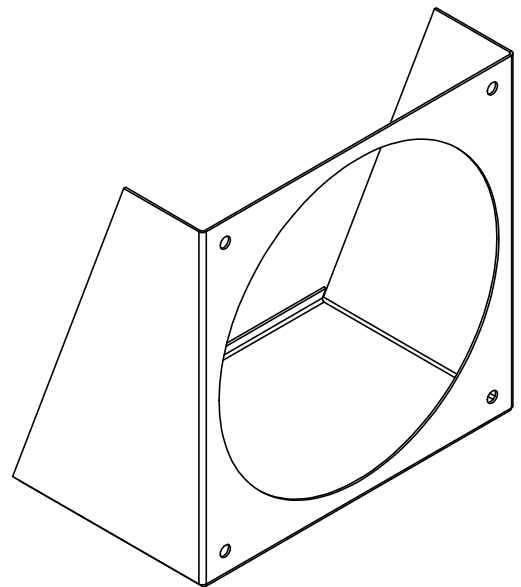
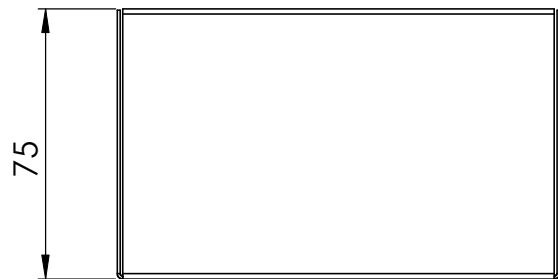
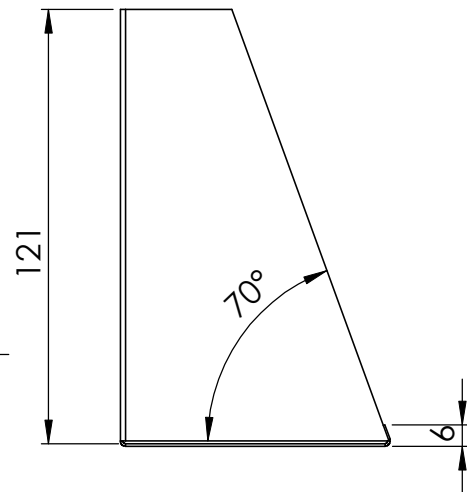
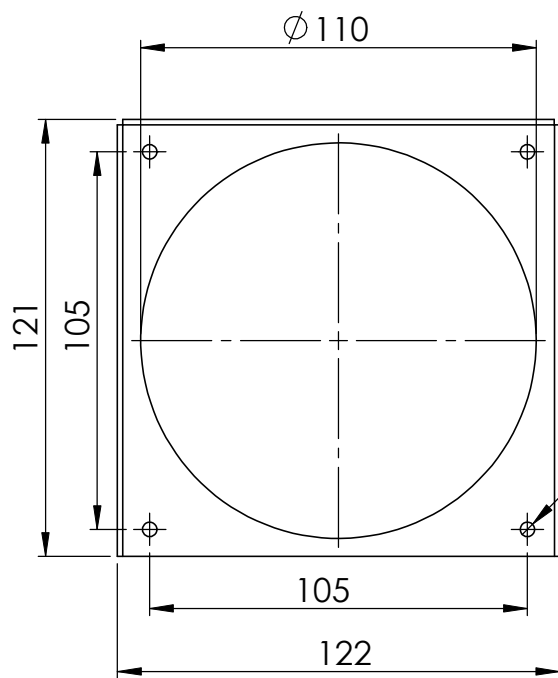
ESCALAS
-
1:1
-

Sistema difusor (I)
base motor

FASE 1

NUMERO -

CODIGO C.A.D. MODIFICACIONES



MATERIAL: Aluminio

UNIDADES: 2

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M



DIBUJADO: Alberto Amarilla
FECHA: 01/07/2010

REVISADO: Nestor Nava
FECHA: 02/07/2010

CLIENTE:

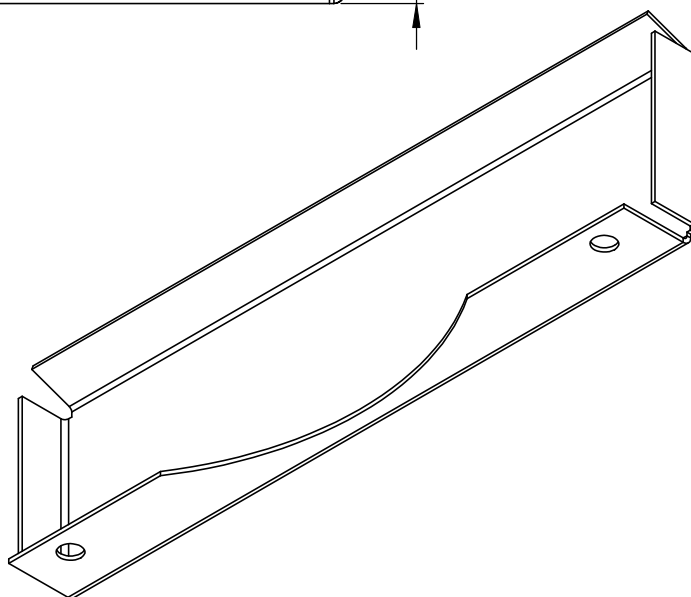
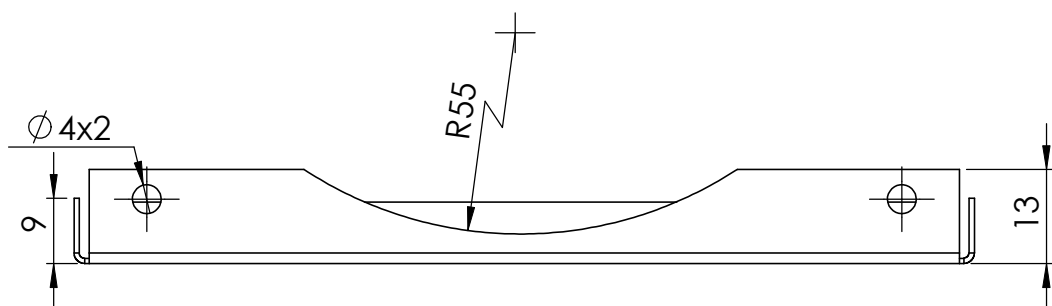
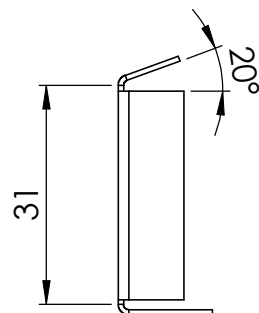
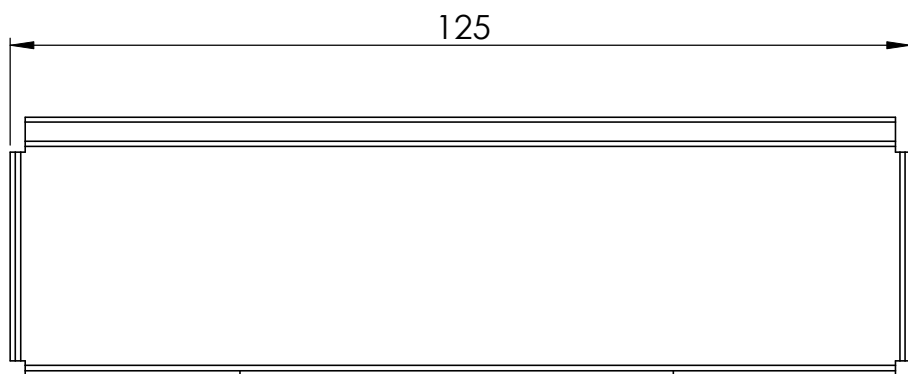
ESCALAS
-
1:2
-

Sistema difusor (II)
Caja

FASE: 2

NUMERO: -

CODIGO C.A.D. MODIFICACIONES



MATERIAL: Aluminio

UNIDADES: 2

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M



DIBUJADO Alberto Amarilla
FECHA 01/07/2010

REVISADO Nestor Nava
FECHA 02/07/2010

CLIENTE:

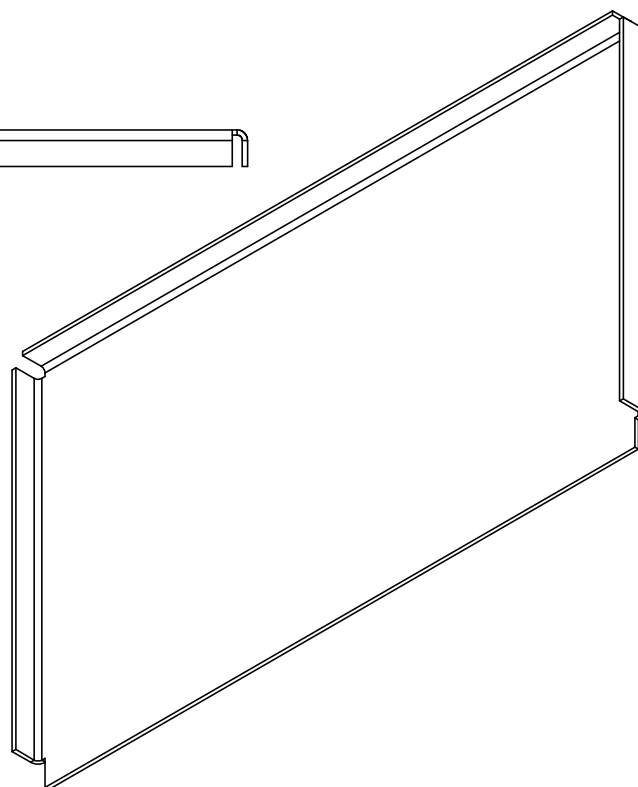
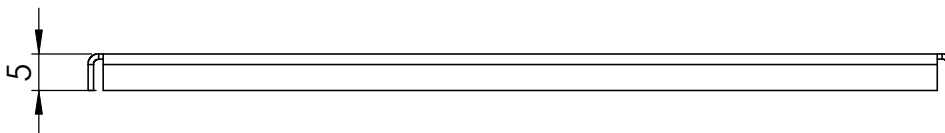
ESCALAS
-
1:1
-

Sistema difusor (II)
Pieza superior

FASE 2

NUMERO -

CODIGO C.A.D. MODIFICACIONES



MATERIAL: Aluminio

UNIDADES: 2

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M



DIBUJADO Alberto Amarilla
FECHA 01/07/2010

REVISADO Nestor Nava
FECHA 02/07/2010

CLIENTE:

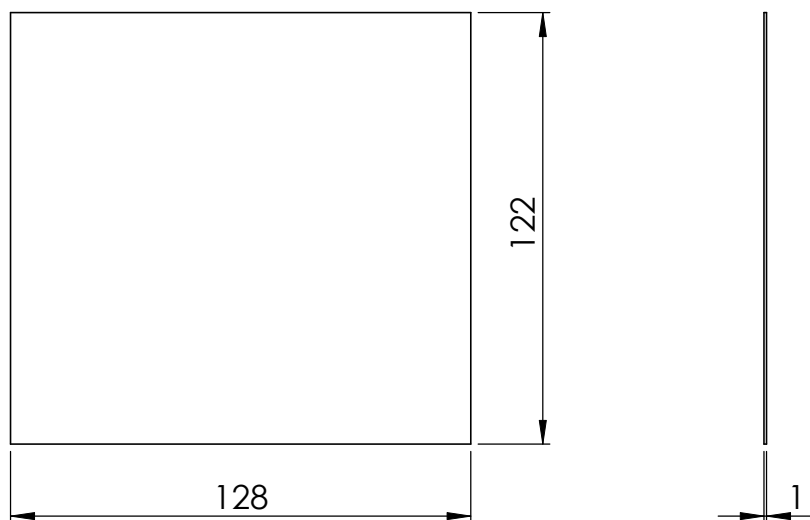
ESCALAS
-
1:1
-


Sistema difusor (II)
Base

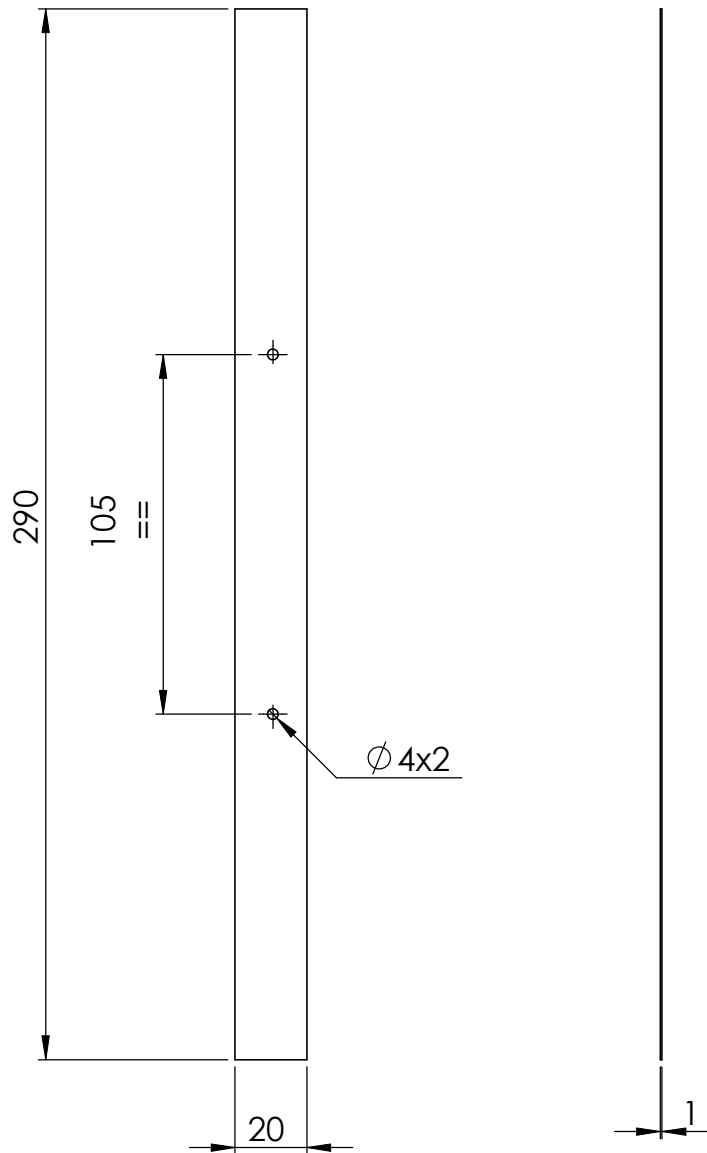
FASE 2

NUMERO -

CODIGO C.A.D. MODIFICACIONES



MATERIAL: Aluminio		UNIDADES: 2									
<small>REVISION</small>	<small>FECHA</small>	<small>MODIFICACION</small>									
UC3M 		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><small>DIBUJADO</small></td> <td>Alberto Amarilla</td> </tr> <tr> <td><small>FECHA</small></td> <td>01/07/2010</td> </tr> </table>	<small>DIBUJADO</small>	Alberto Amarilla	<small>FECHA</small>	01/07/2010	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><small>REVISADO</small></td> <td>Nestor Nava</td> </tr> <tr> <td><small>FECHA</small></td> <td>02/07/2010</td> </tr> </table>	<small>REVISADO</small>	Nestor Nava	<small>FECHA</small>	02/07/2010
<small>DIBUJADO</small>	Alberto Amarilla										
<small>FECHA</small>	01/07/2010										
<small>REVISADO</small>	Nestor Nava										
<small>FECHA</small>	02/07/2010										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><small>ESCALAS</small></td> <td style="width: 50%;"></td> </tr> <tr> <td>-</td> <td></td> </tr> <tr> <td>1:2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>-</td> <td></td> </tr> </table>		<small>ESCALAS</small>		-		1:2		-		<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 0 auto; width: 80%;"> <p>Sistema difusor (II)</p> <p>tapa</p> </div>	
<small>ESCALAS</small>											
-											
1:2											
-											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><small>FASE</small></td> <td style="width: 50%; text-align: center;">2</td> </tr> </table>		<small>FASE</small>	2	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><small>NUMERO</small></td> <td style="width: 50%; text-align: center;">-</td> </tr> </table>		<small>NUMERO</small>	-				
<small>FASE</small>	2										
<small>NUMERO</small>	-										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><small>CODIGO C.A.D.</small></td> <td style="width: 50%;"><small>MODIFICACIONES</small></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </table>		<small>CODIGO C.A.D.</small>	<small>MODIFICACIONES</small>			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><small>CODIGO C.A.D.</small></td> <td style="width: 50%;"><small>MODIFICACIONES</small></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </table>		<small>CODIGO C.A.D.</small>	<small>MODIFICACIONES</small>		
<small>CODIGO C.A.D.</small>	<small>MODIFICACIONES</small>										
<small>CODIGO C.A.D.</small>	<small>MODIFICACIONES</small>										



MATERIAL: Aluminio

UNIDADES: 20

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M



DIBUJADO Alberto Amarilla
FECHA 01/07/2010

REVISADO Nestor Nava
FECHA 02/07/2010

CLIENTE:

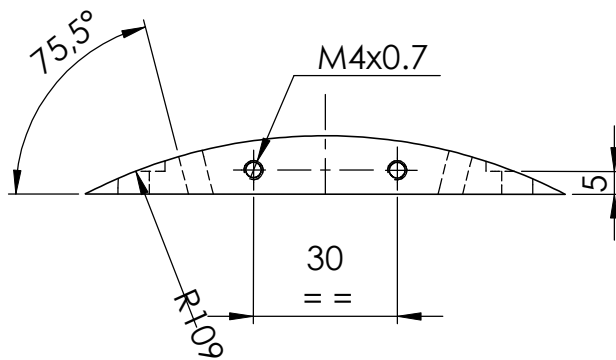
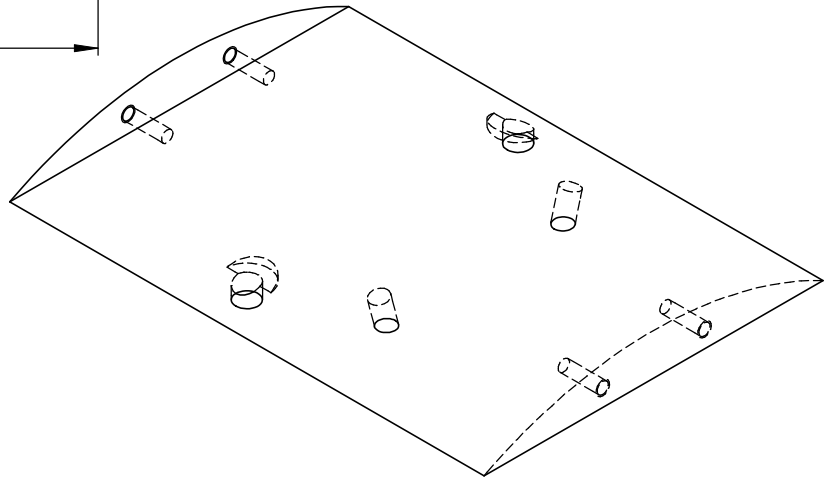
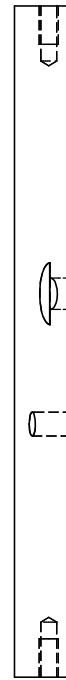
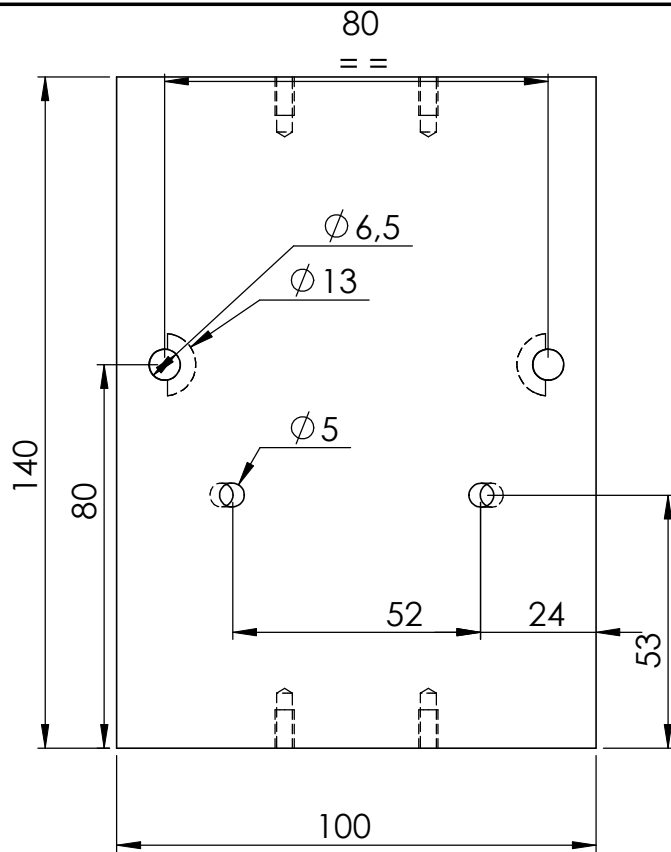
ESCALAS
-
1:2
-

Sistema generador flujo
Sujección ventiladores

FASE **1**

NUMERO -

CODIGO C.A.D. MODIFICACIONES



MATERIAL: Acero

UNIDADES: 1

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M



DIBUJADO: Alberto Amarilla
FECHA: 01/07/2010

REVISADO: Nestor Nava
FECHA: 02/07/2010

CLIENTE:

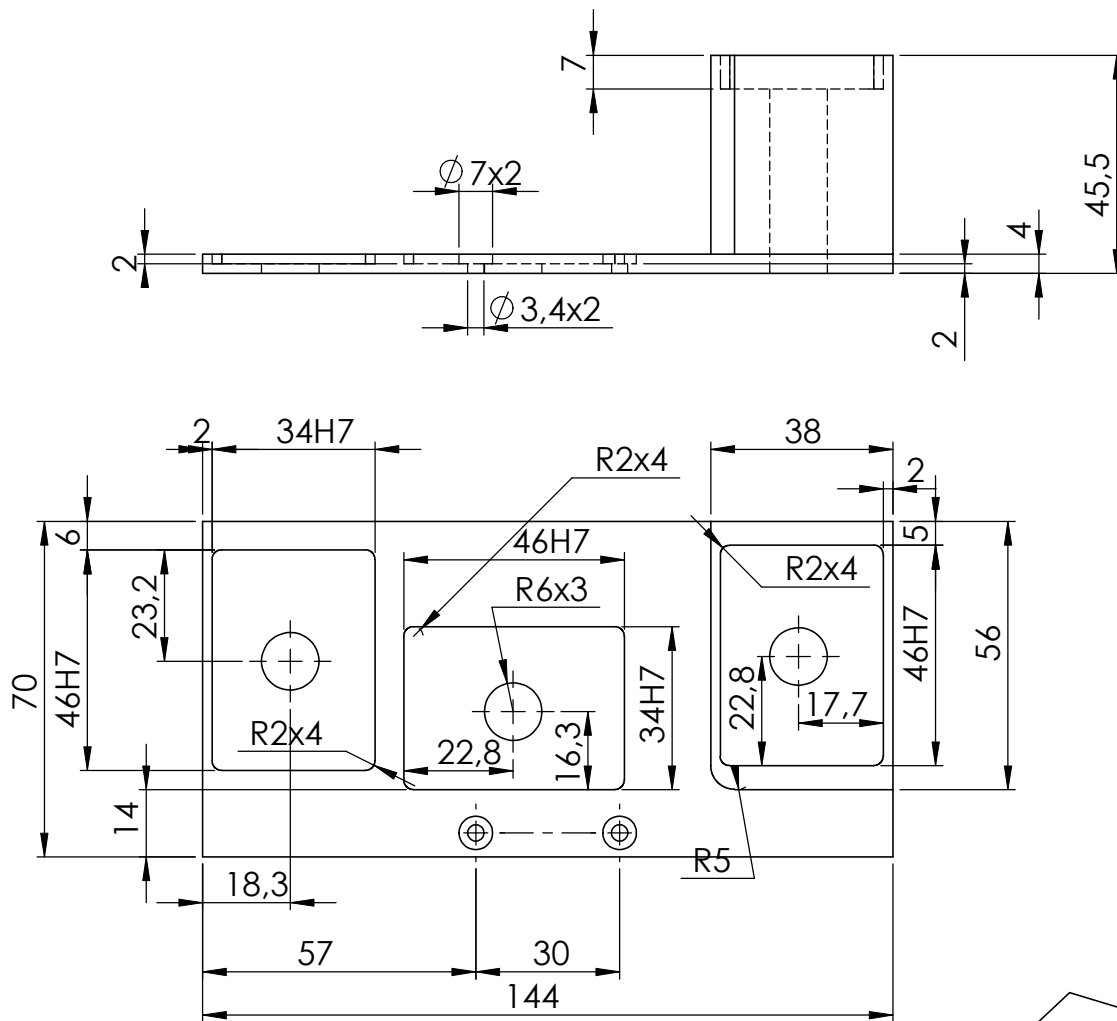
ESCALAS
-
1:1.5
-

Base sensor
Base sensor vertical

FASE: **1**

NUMERO: -

CODIGO C.A.D. MODIFICACIONES



MATERIAL: Acero

UNIDADES: 1

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M



DIBUJADO: Alberto Amarilla
FECHA: 01/07/2010

REVISADO: Nestor Nava
FECHA: 02/07/2010

CLIENTE:

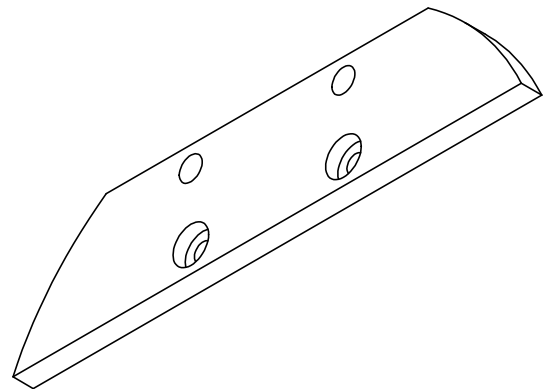
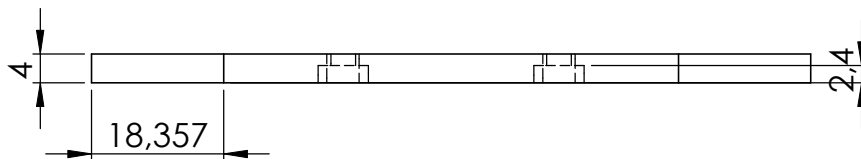
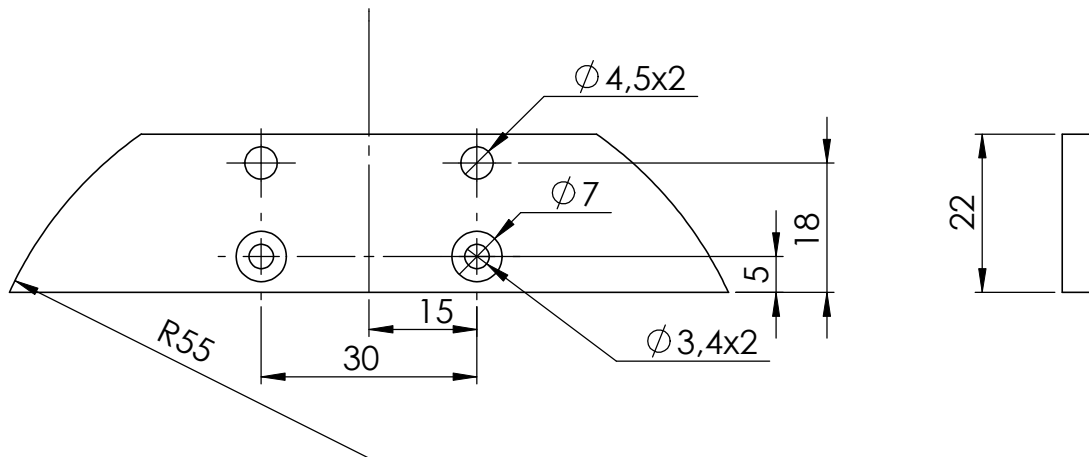
ESCALAS
-
1:1.5
-

Base sensor
Base inferior del sensor

FASE: 1

NUMERO: -

CODIGO C.A.D. MODIFICACIONES



MATERIAL: Acero

UNIDADES: 1

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M



DIBUJADO Alberto Amarilla
FECHA 01/07/2010

REVISADO Nestor Nava
FECHA 02/07/2010

CLIENTE:

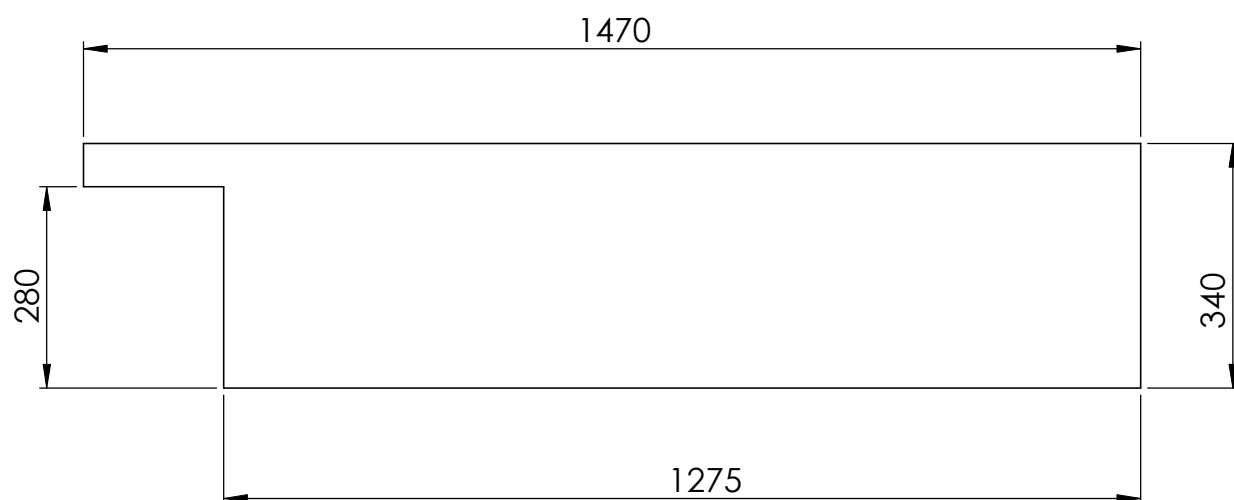
ESCALAS
-
1:1
-

Base sensor
Base sensor horizontal

FASE **1**

NUMERO -

CODIGO C.A.D. MODIFICACIONES



MATERIAL: Acero

UNIDADES: 2

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M



DIBUJADO Alberto Amarilla
FECHA 01/07/2010

REVISADO Nestor Nava
FECHA 02/07/2010

CLIENTE:

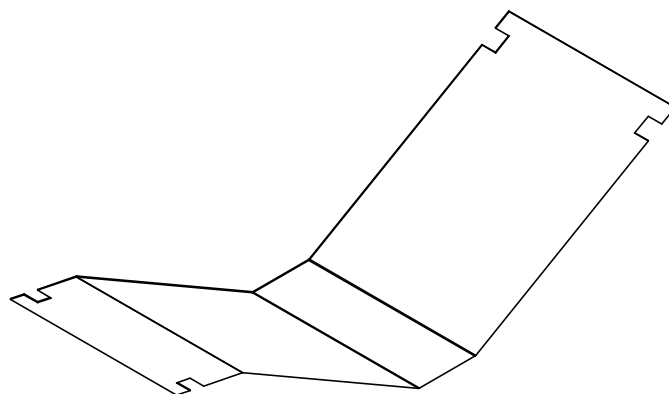
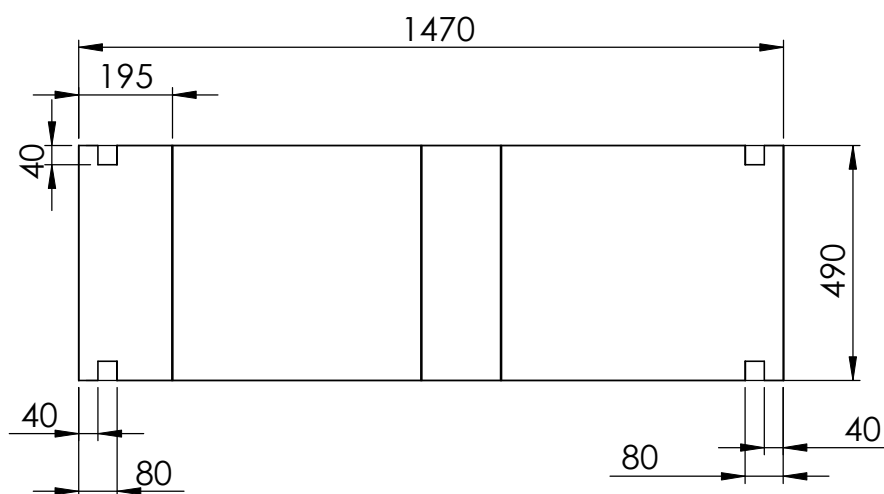
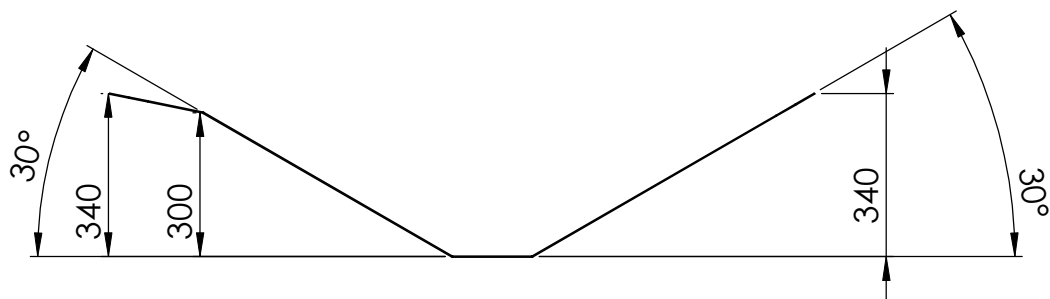
ESCALAS
-
1:10
-

Sistema recolector de polvo
Pieza lateral

FASE **1**

NUMERO -

CODIGO C.A.D. MODIFICACIONES



MATERIAL: Acero

UNIDADES: 1

REVISION	FECHA	MODIFICACION

UC3M



DIBUJADO: Alberto Amarilla
FECHA: 01/07/2010

REVISADO: Nestor Nava
FECHA: 02/07/2010

CLIENTE:

ESCALAS
-
1:15
-

Sistema recolector de polvo
Fondo bandeja

FASE: 1

NUMERO: -

CODIGO C.A.D. MODIFICACIONES